

Resumen de Lógica

Uziel Ludueña

November 25, 2020

Contents

1	Relaciones binarias	4
1.1	Propiedades notables de relaciones binarias	4
1.2	Relaciones de equivalencia	4
1.3	Correspondencia entre relaciones de equivalencia y particiones	5
2	Ordenes parciales	6
2.1	Diagramas de Hasse	6
2.2	Elementos maximales, maximos, minimales y minimos	7
2.3	Supremos	7
2.4	Infimos	8
2.5	Homomorfismos de posets	8
2.6	Isomorfismo de posets	8
2.7	Reticulados	9
3	Version algebraica del concepto de reticulado	13
3.1	Subreticulados	14
3.2	Homomorfismo de reticulados	15
3.3	Congruencia de reticulados	16
4	Reticulados acotados	18
4.1	Subreticulados acotados	18
4.2	Homomorfismo de reticulados acotados	18
4.3	Congruencias de reticulados acotados	19

5	Reticulados complementados	20
5.1	Subreticulados complementados	21
5.2	Homomorfismo de reticulados complementados	21
5.3	Congruencias de reticulados complementados	22
6	Algebras de Boole	23
7	Teoremas del filtro primo y de Rasiova Sikorski	25
8	Sintaxis de la logica de primer orden	27
8.1	Ocurrencias	27
8.2	Variables	28
8.3	Tipos	29
8.4	Terminos	29
8.4.1	Unicidad de la lectura de terminos	30
8.4.2	Subterminos	30
8.5	Formulas	32
8.5.1	Unicidad de la lectura de formulas	32
8.5.2	Subformulas	33
8.6	Variables libres	33
9	Semantica de la logica de primer orden	34
9.1	Estructuras de tipo τ	34
9.2	El valor de un termino de una estructura	35
9.3	El valor de verdad de una formula en un estructura	36
9.4	Equivalencia de formulas	37
9.5	Homomorfismos	37
10	Notacion declaratoria para terminos	38
11	Notacion declaratoria para formulas	39
12	Teorias de primer orden	43

13 Definicion del concepto de prueba	43
13.1 Reglas	43
13.2 Axiomas logicos	46
13.3 Justificaciones	46
13.4 Concatenaciones balanceadas de justificaciones	48
13.5 Pares adecuados	49
13.6 Dependencia de constantes en pares adecuados	49
13.7 Definicion de prueba	50
14 El concepto de teorema	52
15 Propiedades basicas de pruebas y teoremas	52
15.1 Consistencia	53
16 El algebra de Lindenbaum	53
17 Teorema de la completitud	55
18 Interpretacion semantica del algebra de Lindembaum	56
19 La aritmetica de Peano	57

1 Relaciones binarias

Definición 1. Una *relacion binaria* sera un conjunto cuyos elementos son pares ordenados. Una relacion binaria sobre un conjunto A sera una relacion binaria, la cual es subconjunto de A^2 .

Notese que si R es una relacion binaria sobre A y $A \subseteq B$, entonces R es una relacion sobre B . Como es usual, cuando R sea una relacion binaria sobre un conjunto A , diremos aRb en lugar de $(a, b) \in R$

1.1 Propiedades notables de relaciones binarias

Algunas propiedades que puede cumplir una relacion binaria R sobre un conjunto A son:

- Reflexividad: xRx , cualesquiera sea $x \in A$
- Transitividad: xRy y yRz implica xRz , cualesquiera sean $x, y, z \in A$
- Simetria: xRy implica yRx , cualesquiera sean $x, y \in A$
- Antisimetria: xRy y yRx implica $x = y$, cualesquiera sean $x, y \in A$

1.2 Relaciones de equivalencia

Definición 2. Sea A un conjunto cualquiera. Por una *relacion de equivalencia sobre A* entenderemos una relacion binaria sobre A la cual es reflexiva, transitiva y simetrica, con respecto a A .

Definición 3. Dada una funcion $F: A \rightarrow B$, definimos:

$$\ker F = \{(x, y) \in A^2 : F(x) = F(y)\}$$

Definición 4. Dada una relacion de equivalencia R sobre A y $a \in A$, definimos:

$$a/R = \{b \in A : aRb\}$$

El conjunto a/R sera llamado la *clase de equivalencia* de a , con respecto a R .

Observacion 1. $a \in a/R$, pues R es reflexiva, por lo tanto aRa .

Observacion 2. $aRb \iff a/R = b/R$, sencillo de demostrar con las propiedades

Observacion 3. $a/R \cap b/R = \emptyset$ o $a/R = b/R$, sencillo de demostrar viendo que pasa si aRb y si no aRb

Definición 5. Dada una relacion de equivalencia R sobre A , definimos:

$$A/R = \{a/R : a \in A\}$$

Diremos que A/R es el cociente de A por R . Notese que A/R es el conjunto de clases de equivalencia de cada elemento de A .

Observacion 4. Sea $F: A \rightarrow B$, entonces:

1. F es inyectiva $\iff \ker F = \{(x, y) \in A^2 : x = y\}$
2. Si F es sobreyectiva, entonces hay una biyeccion entre $A/\ker F$

Definición 6. Si R es una relacion de equivalencia sobre A , definimos la funcion $\pi_R: A \rightarrow A/R$ por $\pi_R(a) = a/R$, para cada $a \in A$. Esta funcion es llamada la *proyeccion canonica* respecto de R .

Observacion 5. Sea R una relacion de equivalencia sobre A . Entonces $\ker \pi_R = R$

1.3 Correspondencia entre relaciones de equivalencia y particiones

Definición 7. Dado un conjunto A , por una *particion de* A entenderemos a un conjunto \mathcal{P} tal que:

- Cada elemento de \mathcal{P} es un subconjunto no vacio de A
- Si $S_1, S_2 \in \mathcal{P}$ y $S_1 \neq S_2$, entonces $S_1 \cap S_2 = \emptyset$
- $A = \bigcup_{S \in \mathcal{P}} S$

Observacion 6. Si \mathcal{P} es una particion de A , entonces para cada $a \in A$ hay un unico $S \in \mathcal{P}$ tal que $a \in S$.

Definición 8. Dada una particion \mathcal{P} de un conjunto A , podemos definir una relacion binaria asociada a \mathcal{P} de la siguiente manera:

$$R_{\mathcal{P}} = \{(a, b) \in A^2 : a, b \in S, \text{ para algun } S \in \mathcal{P}\}$$

Teorema 1. Sea A un conjunto cualquiera. Sean

$$Part = \{\text{particiones de } A\}$$

$$Req = \{\text{relaciones de equivalencia sobre } A\}$$

Entonces, las funciones:

$$f : Part \rightarrow ReEq$$

$$\mathcal{P} \rightarrow R_{\mathcal{P}}$$

$$g : ReEq \rightarrow Part$$

$$R \rightarrow A/R$$

son biyecciones una de la otra

Proof. Se acepta sin demostracion

□

2 Ordenes parciales

Definición 9. Una relacion binaria sobre R sobre un conjunto A sera llamada un *orden parcial sobre A* , si es reflexiva, transitiva y antisimetrica respecto de A .

Muchas veces denotaremos con \leq a una relacion binaria que sea un orden parcial.

Ademas, si hemos denotado \leq a cierto orden parcial sobre un conjunto A , entonces:

1. Denotaremos con $<$ a la relacion binaria $\{(a, b) \in A^2 : a \leq b \text{ y } a \neq b\}$. Cuando se de que $a < b$, diremos que *a es menor que b* , o que *b es mayor que a*
2. Denotaremos con \prec a la relacion binaria $\{(a, b) \in A^2 : a < b \text{ y no existe } z \text{ tal que } a < z < b\}$. Cuando se de que $a \prec b$, diremos que *a es cubierto por b* o que *b cubre a a* .

Definición 10. Un *conjunto* parcialmente ordenado o poset, es un par (P, \leq) , donde P es un conjunto no vacio cualquiera y \leq es un orden parcial sobre P . Dado un poset (P, \leq) , el conjunto P sera llamado el *universo* de (P, \leq) .

2.1 Diagramas de Hasse

Dado un poset (P, \leq) . con P finito, podemos realizar un diagrama llamado *diagrama de Hasse*, siguiendo las siguientes instrucciones:

1. Asociar en forma inyectiva a cada $a \in P$ un punto p_a del plano
2. Trazar un segmento de recta uniendo los puntos p_a y p_b , cada vez que $a \prec b$

3. Realizar los antes dicho de tal forma que:

- (a) Si $a \prec b$, entonces p_a esta por debajo de p_b
- (b) Si un punto p_a ocurre en un segmento del diagrama, entonces lo hace en alguno de sus extremos

La relacion de \leq puede ser reconstruida facilmente apartir del diagrama. $a \leq b$ sucedera si y solo si $p_a = p_b$ o hay una sucesion de caminos ascendentes de segmentos desde p_a hasta p_b .

2.2 Elementos maximales, maximos, minimales y minimos

Definición 11. Sea (P, \leq) un poset.

Diremos que $a \in P$ es un elemento maximal de (P, \leq) , si no existe un $b \in P$ tal que $a < b$.

Diremos que $a \in P$ es un elemento maximo de (P, \leq) si $b \leq a$, para todo $b \in P$. En caso de existir, sera denotado como 1, y muchas veces diremos que (P, \leq) tiene un 1 para expresar que (P, \leq) tiene un maximo

Diremos que $a \in P$ es un elemento minimal de (P, \leq) , si no existe un $b \in P$ tal que $b < a$.

Diremos que $a \in P$ es un elemento minimo de (P, \leq) si $a \leq b$ para todo $b \in P$. En caso de existir, sera denotado como 0, y muchas veces diremos que (P, \leq) tiene un 0 para expresar que (P, \leq) tiene un minimo

Observacion 7. Un poset (P, \leq) tiene a lo sumo 1 maximo (resp. minimo)

Observacion 8. Todo elemento maximo (resp. minimo) de (P, \leq) es un elemento maximal (resp. minimal) de (P, \leq)

2.3 Supremos

Sea (P, \leq) un poset. Dado $S \subseteq P$, diremos que un elemento $a \in P$ es *cota superior* de S en (P, \leq) cuando $b \leq a$, para todo $b \in S$. Notese que todo elemento de P es cota superior de \emptyset en (P, \leq) . Un elemento $a \in P$ sera llamado *supremo* de S en (P, \leq) , cuando se den las siguientes propiedades:

1. a es cota superior de S en (P, \leq)
2. Para cada $b \in P$, si b es cota superior de S en (P, \leq) , entonces $a \leq b$

2.4 Infimos

Sea (P, \leq) un poset. Dado $S \subseteq P$, diremos que un elemento $a \in P$ es *cota inferior* de S en (P, \leq) cuando $a \leq b$, para todo $b \in S$. Notese que todo elemento de P es cota inferior de \emptyset en (P, \leq) . Un elemento $a \in P$ sera llamado *infimo* de S en (P, \leq) , cuando se den las siguientes propiedades:

1. a es cota inferior de S en (P, \leq)
2. Para cada $b \in P$, si b es cota inferior de S en (P, \leq) , entonces $b \leq a$

Observacion 9. Si a es supremo (resp. infimo) de S en (P, \leq) y a' es supremo (resp. infimo) de S en (P, \leq) , entonces $a = a'$

Observacion 10. a es supremo (resp. infimo) de P en $(P, \leq) \iff a$ es maximo (resp. minimo) de (P, \leq)

2.5 Homomorfismos de posets

Definición 12. Sea (P, \leq) y (P', \leq') posets. Una funcion $F: P \rightarrow P'$ sera llamada un *homomorfismo* de (P, \leq) en (P', \leq') si para todo $x, y \in P$ se cumple que $x \leq y$ implica $F(x) \leq' F(y)$. Escribiremos $F: (P, \leq) \rightarrow (P', \leq')$ para expresar que F es un homomorfismo de (P, \leq) en (P', \leq')

2.6 Isomorfismo de posets

Definición 13. Sea (P, \leq) y (P', \leq') posets. Una funcion $F: P \rightarrow P'$ sera llamada un *isomorfismo* de (P, \leq) en (P', \leq') si F es biyectiva, F es un homomorfismo de (P, \leq) en (P', \leq') y F^{-1} es un homomorfismo de (P', \leq') en (P, \leq) . Escribiremos $(P, \leq) \cong (P', \leq')$ cuando exista un isomorfismo de (P, \leq) en (P', \leq') y en tal caso diremos que (P, \leq) y (P', \leq') son isomorfos.

Definición 14. Dada una funcion $F: A \rightarrow B$ y $S \subseteq A$, denotaremos con $F(S)$ al conjunto $\{F(a) : a \in S\}$

Lema 1. Sean (P, \leq) y (P', \leq') posets. Supongamos F es un isomorfismo de (P, \leq) y (P', \leq')

1. Para cada $S \subseteq P$ y cada $a \in P$, se tiene que a es cota superior (resp. cota inferior) de $S \iff F(a)$ es cota superior (resp. inferior) de $F(S)$
2. Para cada $S \subseteq P$ y cada $a \in P$, se tiene que existe $\sup(S) \iff$ existe $\sup(F(S))$, y en el caso de que existan tales elementos, se tiene que $F(\sup(S)) = \sup(F(S))$

3. Para cada $S \subseteq P$ y cada $a \in P$, se tiene que existe $\inf(S) \iff$ existe $\inf(F(S))$, y en el caso de que existan tales elementos, se tiene que $F(\inf(S)) = \inf(F(S))$

4. Para cada $a \in P$, a es maximo (resp. minimo) $\iff F(a)$ es maximo (resp. minimo)

5. Para cada $a \in P$, a es maximal (resp. minimal) $\iff F(a)$ es maximal (resp. minimal)

6. Para $a, b \in P$, tenemos $a \prec b \iff F(a) \prec' F(b)$

Proof. (a) Supongamos a es cota superior de S . Sea $s \in S$. Como $s \leq a$, tenemos que $F(s) \leq' F(a)$. Supongamos ahora que $F(a)$ es cota superior de $F(S)$. Sea $s \in S$. Como $F(s) \leq' F(a)$, tenemos que $s = F^{-1}(F(s)) \leq F^{-1}(F(a)) = a$.

(b) Supongamos que existe $\sup(S)$. Entonces por (a) $F(\sup(S))$ es cota superior de $F(S)$. Supongamos b es cota superior de $F(S)$, entonces $F^{-1}(b)$ es cota superior de S . Por lo tanto, $\sup(S) \leq F^{-1}(b)$ y entonces $F(\sup(S)) \leq' b$. La *vuelta* es analoga.

(c) La prueba es analoga a (b)

(d) Supongamos $a \in P$ es maximo. Pero entonces $a = \sup(P)$, y entonces $F(a) = \sup(F(P)) = \sup(P')$. La *vuelta* es analoga.

(e) Supongamos $b \in P$ tal que no existe $a \in P$ tal que $b \leq a \Rightarrow a = b$. Sea $c \in P$ tal que $F(b) \leq' F(c)$, entonces $b \leq c$, y entonces $b = c$, $F(b) = F(c)$. Luego $F(b)$ es maximal. La *vuelta* es analoga.

(f) Sean $a, b \in P$ tal que $a \prec b$. Luego tenemos que $F(a) \leq' F(b)$. Supongamos existe $z \in P$ tal que $F(a) \leq' F(z) \leq' F(b)$, entonces tendríamos $a \leq z \leq b$. Como $a \prec b$, se sigue que $z = a$ o $z = b$. Luego $F(a) \prec' F(b)$. La *vuelta* es analoga. \square

2.7 Reticulados

Definición 15. Diremos que un poset (P, \leq) es un *reticulado* si para todo $a, b \in P$, existen $\sup(\{a, b\})$ e $\inf(\{a, b\})$

Definición 16. Dado un reticulado (P, \leq) , definimos 2 operacion binarias:

$$s : P^2 \rightarrow P$$

$$(a, b) \rightarrow \sup(\{a, b\})$$

$$i : P^2 \rightarrow P$$

$$(a, b) \rightarrow \inf(\{a, b\})$$

Escribiremos $a \text{ s } b$ en lugar de $s(a, b)$ y $a \text{ i } b$ en lugar de $i(a, b)$

Lema 2. *Dado un reticulado (L, \leq) y elementos $x, y \in L$, se cumplen:*

1. $x \leq x \text{ s } y$
2. $x \text{ i } y \leq x$
3. $x \text{ s } x = x \text{ i } x = x$
4. $x \text{ s } y = y \text{ s } x$
5. $x \text{ i } y = y \text{ i } x$

Proof. (1) Claramente $(x \text{ s } y)$ es cota superior de x . Por lo tanto $x \leq x \text{ s } y$

(2) Claramente $(x \text{ i } y)$ es cota inferior de x . Por lo tanto $x \text{ i } y \leq x$

(3) Supongamos $(x \text{ s } x) = z \neq x$. Tenemos que z es cota superior de x por lo tanto $x \leq z$. Pero tambien x es cota superior de x y por lo tanto z no puede ser la minima cota superior. El caso del infimo es analogo.

(4) $(x \text{ s } y) = \sup(\{x, y\}) = \sup(\{y, x\}) = (y \text{ s } x)$

(5) $(x \text{ i } y) = \inf(\{x, y\}) = \inf(\{y, x\}) = (y \text{ i } x)$ □

Lema 3. *Dado un reticulado (L, \leq) y elementos $x, y \in L$, son equivalentes:*

1. $x \leq y$
2. $x \text{ s } y = y$
3. $x \text{ i } y = x$

Proof. (1) \Rightarrow (2) Claramente y es cota superior de $\{x, y\}$ por (1). Y trivialmente es la minima ya que es igual a uno de sus elementos.

(2) \Rightarrow (3) Claramente y es cota superior de $\{x, y\}$, por lo tanto $x \leq y$. Luego se tiene que x es cota inferior de $\{x, y\}$. Trivialmente es la maxima.

(3) \Rightarrow (1) Claramente x es cota inferior de $\{x, y\}$, por lo tanto $x \leq y$. □

Lema 4 (Leyes de absorcion). *Dado un reticulado (L, \leq) y elementos $x, y \in L$, se tiene que:*

1. $x \text{ s } (x \text{ i } y) = x$
2. $x \text{ i } (x \text{ s } y) = x$

Proof. (1) Claramente $(x \mathbf{i} y) \leq x$, y por lo tanto $(x \mathbf{i} y) \mathbf{s} x = x$

(2) Claramente $x \leq (x \mathbf{s} y)$, y por lo tanto $x \mathbf{i} (x \mathbf{s} y) = x$ □

Lema 5. *Dado un reticulado (L, \leq) y elementos $x, y, z \in L$, se tiene que:*

$$1. (x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z = x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$$

$$2. (x \mathbf{i} y) \mathbf{i} z = x \mathbf{i} (y \mathbf{i} z)$$

Proof. (1) Notese que $x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$ es cota superior de $\{x, y, z\}$ ya que:

$$x \leq x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$$

$$y \leq (y \mathbf{s} z) \leq x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$$

$$z \leq (y \mathbf{s} z) \leq x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$$

En particular, tenemos que $x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$ es cota superior de $\{x, y\}$, y entonces tenemos que $x \mathbf{s} y \leq x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$. Es decir, $x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$ es cota superior de $\{x \mathbf{s} y, z\}$, y por lo tanto $(x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z \leq x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$.

Notese ahora que $(x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z$ es cota superior de $\{x, y, z\}$, ya que:

$$x \leq (x \mathbf{s} y) \leq (x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z$$

$$y \leq (x \mathbf{s} y) \leq (x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z$$

$$z \leq (x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z$$

En particular, tenemos que $(x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z$ es cota superior de $\{y, z\}$, y por lo tanto $y \mathbf{s} z \leq (x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z$. Es decir, $(x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z$ es cota superior de $\{x, y \mathbf{s} z\}$, y por lo tanto $x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z) \leq (x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z$.

Luego tenemos que $(x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z = x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z)$

(2) Es analoga, si alguien la quiere hacer □

Lema 6. *Dado un reticulado (L, \leq) y elementos $x, y, z, w \in L$, se tiene que si $x \leq z$ y $y \leq w$, entonces*

$$1. x \mathbf{s} y \leq z \mathbf{s} w$$

$$2. x \mathbf{i} y \leq z \mathbf{i} w$$

Proof. (1) Notese que

$$\begin{aligned}x &\leq z \leq z \textbf{ s } w \\y &\leq w \leq z \textbf{ s } w\end{aligned}$$

Luego $z \textbf{ s } w$ es cota superior de $\{x, y\}$ y por lo tanto $x \textbf{ s } y \leq z \textbf{ s } w$

(2) Notese que

$$\begin{aligned}z &\geq x \geq x \textbf{ i } y \\w &\geq y \geq x \textbf{ i } y\end{aligned}$$

Luego $x \textbf{ i } y$ es cota inferior de $\{z, w\}$ y por lo tanto $x \textbf{ i } y \leq z \textbf{ i } w$ □

Lema 7. Dado un reticulado (L, \leq) y elementos $x, y, z \in L$, se tiene que

$$(x \textbf{ i } y) \textbf{ s } (x \textbf{ i } z) \leq x \textbf{ i } (y \textbf{ s } z)$$

Proof. Notese que

$$\begin{aligned}(x \textbf{ i } y), (x \textbf{ i } z) &\leq x \\(x \textbf{ i } y), (x \textbf{ i } z) &\leq y \textbf{ s } z\end{aligned}$$

Tenemos entonces que $(x \textbf{ i } y), (x \textbf{ i } z) \leq x \textbf{ i } (y \textbf{ s } z)$ y por lo tanto $(x \textbf{ i } y) \textbf{ s } (x \textbf{ i } z) \leq x \textbf{ i } (y \textbf{ s } z)$ □

Lema 8. Sea (L, \leq) un reticulado. Dados elementos $x_1, \dots, x_n \in L$, con $n \geq 2$, se tiene que:

$$\begin{aligned}(\dots(x_1 \textbf{ s } x_2) \textbf{ s } \dots) \textbf{ s } x_n &= \sup(\{x_1, \dots, x_n\}) \\(\dots(x_1 \textbf{ i } x_2) \textbf{ i } \dots) \textbf{ i } x_n &= \inf(\{x_1, \dots, x_n\})\end{aligned}$$

Proof. Lo haremos por induccion en n . Claramente el resultado vale para $n = 2$. Supongamos que vale para n y veamos entonces que vale para $n + 1$. Sean $x_1, \dots, x_{n+1} \in L$. Por hipotesis tenemos que

$$(\dots(x_1 \textbf{ s } x_2) \textbf{ s } \dots) \textbf{ s } x_n = \sup(\{x_1, \dots, x_n\})$$

Es claro que $(\dots(x_1 \textbf{ s } x_2) \textbf{ s } \dots) \textbf{ s } x_{n+1}$ es cota superior de $\{x_1, \dots, x_{n+1}\}$. Sea z otra cota superior de $\{x_1, \dots, x_{n+1}\}$, entonces tenemos que:

$$(\dots(x_1 \textbf{ s } x_2) \textbf{ s } \dots) \textbf{ s } x_n \leq z$$

Pero ademias $x_{n+1} \leq z$ y por lo tanto:

$$(\dots(x_1 \text{ s } x_2) \text{ s } \dots) \text{ s } x_{n+1} \leq z$$

La demostracion para el infimo es analoga.

□

3 Version algebraica del concepto de reticulado

Definición 17. Una terna (L, s, i) , donde L es un conjunto y s, i son dos operaciones binarias sobre L sera llamada *reticulado* cuando cumpla:

- (I1) $x \text{ s } x = x \text{ i } x = x$, cualesquiera sea $x \in L$
- (I2) $x \text{ s } y = y \text{ s } x$, cualesquiera sean $x, y \in L$
- (I3) $x \text{ i } y = y \text{ i } x$, cualesquiera sean $x, y \in L$
- (I4) $(x \text{ s } y) \text{ s } z = x \text{ s } (y \text{ s } z)$, cualesquiera sean $x, y, z \in L$
- (I5) $(x \text{ i } y) \text{ i } z = x \text{ i } (y \text{ i } z)$, cualesquiera sean $x, y, z \in L$
- (I6) $x \text{ s } (x \text{ i } y) = x$, cualesquiera sean $x, y \in L$
- (I7) $x \text{ i } (x \text{ s } y) = x$, cualesquiera sean $x, y \in L$

En tal caso que (L, s, i) sea un reticulado, diremos que L es el *universo* del reticulado.

Teorema 2. Sea (L, s, i) un reticulado. La relacion binaria definida por:

$$x \leq y \iff x \text{ s } y = y$$

es un orden parcial sobre L para el cual se cumple que:

$$\sup(\{x, y\}) = x \text{ s } y$$

$$\inf(\{x, y\}) = x \text{ i } y$$

cualquiera sean $x, y \in L$

Proof. \leq es reflexiva en L , pues $x \leq x \iff x \mathbf{s} x = x$

\leq es antisimetrico en L , pues si $x \leq y$ tenemos que $x \mathbf{s} y = y$, y por otro lado, tenemos que $y \leq x$ y entonces $x \mathbf{s} y = x$. Luego $x = y$

\leq es transitivo, pues si suponemos que $x \leq y$ y $y \leq z$ entonces $x \mathbf{s} z = x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z) = (x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z = y \mathbf{s} z = z$. Luego $x \leq z$

Tenemos entonces que \leq es un orden parcial sobre L .

Veamos ahora que $\sup(\{x, y\}) = x \mathbf{s} y$. Es claro que $x \mathbf{s} y$ es cota superior de $\{x, y\}$. Supongamos que $x, y \leq z$, entonces:

$$(x \mathbf{s} y) \mathbf{s} z = x \mathbf{s} (y \mathbf{s} z) = x \mathbf{s} z = z$$

Luego $x \mathbf{s} y \leq z$ y por lo tanto $x \mathbf{s} y$ es la menor cota superior.

Para probar que $\inf(\{x, y\}) = x \mathbf{i} y$, primero probaremos que para todo $u, v \in L$,

$$u \leq v \iff u \mathbf{i} v = u$$

Supongamos $u \mathbf{s} v = v$, entonces $u \mathbf{i} v = u \mathbf{i} (u \mathbf{s} v) = u$

Ahora si veamos que $\inf(\{x, y\}) = x \mathbf{i} y$. Es claro que $x \mathbf{i} y$ es cota inferior de $\{x, y\}$. Supongamos que $z \leq x, y$, entonces:

$$(x \mathbf{i} y) \mathbf{i} z = x \mathbf{i} (y \mathbf{i} z) = x \mathbf{i} z = z$$

Luego $z \leq x \mathbf{i} y$ y por lo tanto $x \mathbf{i} y$ es la mayor cota inferior. □

3.1 Subreticulados

Definición 18. Dados reticulados $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ y $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ diremos que $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ es un *subreticulado* de $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ si se dan las siguientes condiciones:

1. $L \subseteq L'$
2. $\mathbf{s} = \mathbf{s}'|_{L \times L}$
3. $\mathbf{i} = \mathbf{i}'|_{L \times L}$

Definición 19. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ un reticulado. Un conjunto $S \subseteq L$ es llamado *subuniverso* de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ si es no vacio y cerrado bajo las operaciones \mathbf{s} y \mathbf{i}

Observacion 11. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ un reticulado. S es subuniverso de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}) \iff (S, \mathbf{s}|_{S \times S}, \mathbf{i}|_{S \times S})$ es un subreticulado de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$

3.2 Homomorfismo de reticulados

Definición 20. Sean $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ y $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ reticulados. Una funcion $F: L \rightarrow L'$ sera llamada un *homomorfismo* de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ en $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ si para todo $x, y \in L$ se cumple que:

$$\begin{aligned} F(x \mathbf{s} y) &= F(x) \mathbf{s}' F(y) \\ F(x \mathbf{i} y) &= F(x) \mathbf{i}' F(y) \end{aligned}$$

Un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ en $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ sera llamada *isomorfismo* de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ en $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ cuando sea biyectivo, y su inversa sea tambien un homomorfismo.

Escribiremos $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}) \rightarrow (L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ cuando F sea un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ en $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$

Escribiremos $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}) \cong (L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ cuando exista un isomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ en $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$

Lema 9. Si $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}) \rightarrow (L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ es un homomorfismo biyectivo, entonces F es un isomorfismo

Proof. Debemos probar que F^{-1} es tambien un homomorfismo, es decir que para todo $x, y \in L'$:

$$\begin{aligned} F^{-1}(x \mathbf{s}' y) &= F^{-1}(x) \mathbf{s} F^{-1}(y) \\ F^{-1}(x \mathbf{i}' y) &= F^{-1}(x) \mathbf{i} F^{-1}(y) \end{aligned}$$

Sean $z, w \in L$ los unicos elementos de L tal que cumplen que $F(z) = x$ y $F(w) = y$. Estos elementos existen y son unicos pues F es biyectiva. Entonces, tenemos que:

$$\begin{aligned} F^{-1}(F(z) \mathbf{s}' F(w)) &= F^{-1}(F(z)) \mathbf{s} F^{-1}(F(w)) \\ F^{-1}(F(z) \mathbf{i}' F(w)) &= F^{-1}(F(z)) \mathbf{i} F^{-1}(F(w)) \end{aligned}$$

Y por propiedades de homomorfismo y de funciones con inversa tenemos que:

$$\begin{aligned} F^{-1}(F(z \mathbf{s} w)) &= z \mathbf{s} w \\ F^{-1}(F(z \mathbf{i} w)) &= z \mathbf{i} w \end{aligned}$$

□

Lema 10. Sean $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ y $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ reticulados y sea $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}) \rightarrow (L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ un homomorfismo. Entonces I_F es un subuniverso de $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$. Es decir que F es tambien un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ en $(I_F, \mathbf{s}'|_{I_F \times I_F}, \mathbf{i}'|_{I_F \times I_F})$

Proof. Ya que L no es vacio tenemos que I_F tambien es no vacio. Sean $a, b \in I_F$. Sean $x, y \in L$ tales que $F(x) = a$ y $F(y) = b$. Se tiene que:

$$a \mathbf{s}' b = F(x) \mathbf{s}' F(y) = F(x \mathbf{s} y) \in I_F$$

$$a \mathbf{i}' b = F(x) \mathbf{i}' F(y) = F(x \mathbf{i} y) \in I_F$$

Por lo tanto I_F es cerrado bajo \mathbf{s}' y \mathbf{i}' □

Lema 11. Sean $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ y $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ reticulados y sean (L, \leq) y (L', \leq') los posets asociados. Sea $F: L \rightarrow L'$ una funcion. Entonces F es un isomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ en $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ $\iff F$ es un isomorfismo de (L, \leq) en (L', \leq')

Proof.

\Rightarrow

Supongamos F es un isomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ en $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$. Sean $x, y \in L$ tales que $x \leq y$. Tenemos que $y = x \mathbf{s} y$, por lo cual $F(y) = F(x \mathbf{s} y) = F(x) \mathbf{s}' F(y)$, produciendo $F(x) \leq' F(y)$.

Ahora sean $x, y \in L'$ tales que $x \leq' y$. Tenemos que $y = x \mathbf{s}' y$, por lo cual $F^{-1}(y) = F^{-1}(x \mathbf{s}' y) = F^{-1}(x) \mathbf{s} F^{-1}(y)$ produciendo $F^{-1}(x) \leq F^{-1}(y)$.

\Leftarrow

Supongamos F es un isomorfismo de (L, \leq) en (L', \leq') . Sean $x, y \in L$ tales que $y = x \mathbf{s} y$. Tenemos entonces que $x \leq y$ y por lo tanto $F(x) \leq' F(y)$, produciendo $F(y) = F(x \mathbf{s} y) = F(x) \mathbf{s}' F(y)$

Ahora sean $x, y \in L'$ tales que $y = x \mathbf{s}' y$. Tenemos entonces que $x \leq' y$ y por lo tanto $F^{-1}(x) \leq F^{-1}(y)$, produciendo $F^{-1}(y) = F^{-1}(x \mathbf{s}' y) = F^{-1}(x) \mathbf{s} F^{-1}(y)$

□

3.3 Congruencia de reticulados

Definición 21. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ un reticulado. Una *congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$* sera una relacion de equivalencia θ la cual cumpla:

$$x\theta x' \text{ y } y\theta y' \Rightarrow (x \mathbf{s} y)\theta(x' \mathbf{s} y') \text{ y } (x \mathbf{i} y)\theta(x' \mathbf{i} y')$$

Gracias a tal propiedad podemos definir sobre L/θ dos operaciones binarias \tilde{s} y \tilde{i}

$$x/\theta \tilde{s} y/\theta = (x \mathbf{s} y)/\theta$$

$$x/\theta \tilde{i} y/\theta = (x \mathbf{i} y)/\theta$$

Definición 22. La terna $(L/\theta, \tilde{s}, \tilde{i})$ es llamada *cociente de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ sobre θ* , y la denotaremos con $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})/\theta$

Lema 12. $(L/\theta, \tilde{s}, \tilde{i})$ es un reticulado. El orden parcial $\tilde{\leq}$ asociado a este reticulado cumple:

$$x/\theta \tilde{\leq} y/\theta \iff y\theta(x \mathbf{s} y)$$

Proof. Veamos que la estructura $(L/\theta, \tilde{s}, \tilde{i})$ cumple las propiedades para ser reticulado una a una. Sea $x/\theta, y/\theta, z/\theta$ elementos cualesquiera de L/θ .

$$(I1) \quad x/\theta \tilde{s} x/\theta = x/\theta \tilde{i} x/\theta = x/\theta, \text{ pues } x \mathbf{s} x = x \mathbf{i} x = x$$

$$(I2) \quad x/\theta \tilde{s} y/\theta = y/\theta \tilde{s} x/\theta, \text{ pues } x \mathbf{s} y = y \mathbf{s} x$$

$$(I3) \quad x/\theta \tilde{i} y/\theta = y/\theta \tilde{i} x/\theta, \text{ pues } x \mathbf{i} y = y \mathbf{i} x$$

...

Ahora veamos que el orden parcial $\tilde{\leq}$ dado se cumple en este reticulado. Por definicion,

$$x/\theta \tilde{\leq} y/\theta \iff y/\theta = x/\theta \tilde{s} y/\theta, \text{ por lo cual } x/\theta \tilde{\leq} y/\theta \iff y/\theta = (x \mathbf{s} y)/\theta \text{ y por lo tanto } y\theta(x \mathbf{s} y) \quad \square$$

Lema 13. Si $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}) \rightarrow (L', \mathbf{s}', \mathbf{i}')$ es un homomorfismo, entonces $\ker F$ es una congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$

Proof. Ya sabemos que $\ker F$ es una relacion de equivalencia, veamos que en este caso cumple la propiedad para ser congruencia.

Sean $x, x', y, y' \in L$ tal que $x\theta x'$ y $y\theta y'$. Luego, tenemos que $F(x) = F(x')$ y $F(y) = F(y')$. Entonces claramente $F(x \mathbf{s} y) = F(x) \mathbf{s}' F(y) = F(x') \mathbf{s}' F(y') = F(x' \mathbf{s} y')$, y por lo tanto $(x \mathbf{s} y)\theta(x' \mathbf{s} y')$

Claramente tambien $F(x \mathbf{i} y) = F(x) \mathbf{i}' F(y) = F(x') \mathbf{i}' F(y') = F(x' \mathbf{i} y')$, y por lo tanto $(x \mathbf{i} y)\theta(x' \mathbf{i} y')$ \square

Lema 14. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ un reticulado y sea θ una congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$. Entonces π_θ es un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ en $(L/\theta, \tilde{s}, \tilde{i})$. Ademas $\ker \pi_\theta = \theta$.

Proof. Sean $x, y \in L$. Tenemos que

$$\pi_\theta(x \text{ s } y) = (x \text{ s } y)/\theta = x/\theta \tilde{\text{ s }} y/\theta = \pi_\theta(x) \tilde{\text{ s }} \pi_\theta(y)$$

$$\pi_\theta(x \text{ i } y) = (x \text{ i } y)/\theta = x/\theta \tilde{\text{ i }} y/\theta = \pi_\theta(x) \tilde{\text{ i }} \pi_\theta(y)$$

Por lo tanto π_θ conserva la operacion supremo e infimo.

□

4 Reticulados acotados

Definición 23. Por un *reticulado acotado* entenderemos una 5-upla $(L, \text{s}, \text{i}, 0, 1)$, tal que (L, s, i) es un reticulado, $0, 1 \in L$, y ademas se cumplen las siguientes propiedades

1. $0 \text{ s } x = x$, para cada $x \in L$
2. $1 \text{ i } x = x$, para cada $x \in L$

4.1 Subreticulados acotados

Definición 24. Dados reticulados acotados $(L, \text{s}, \text{i}, 0, 1)$ y $(L', \text{s}', \text{i}', 0', 1')$ diremos que $(L, \text{s}, \text{i}, 0, 1)$ es un *subreticulado acotado de* $(L', \text{s}', \text{i}', 0', 1')$ si se dan las siguientes condiciones:

1. $L \subseteq L'$
2. $0 = 0'$ y $1 = 1'$
3. $s = s'|_{L \times L}$
4. $i = i'|_{L \times L}$

Sea $(L, \text{s}, \text{i}, 0, 1)$ un reticulado acotado. Un conjunto $S \subseteq L$ es llamado un *subuniverso* de $(L, \text{s}, \text{i}, 0, 1)$ si $0, 1 \in S$, y S es cerrado bajo las operaciones s e i .

4.2 Homomorfismo de reticulados acotados

Definición 25. Sean $(L, \text{s}, \text{i}, 0, 1)$ y $(L', \text{s}', \text{i}', 0', 1')$ reticulados acotados. Una funcion $F: L \rightarrow L'$ sera llamada un *homomorfismo de* $(L, \text{s}, \text{i}, 0, 1)$ en $(L', \text{s}', \text{i}', 0', 1')$ si para todo $x, y \in L$ se cumple

que:

$$F(x \text{ s } y) = F(x)s'F(y)$$

$$F(x \text{ i } y) = F(x)i'F(y)$$

$$F(0) = 0'$$

$$F(1) = 1'$$

Un homomorfismo $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ en $(L', s', i', 0', 1')$ sera llamado *isomorfismo* cuando sea biyectivo y su inversa tambien sea un homomorfismo.

Escribiremos $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1) \rightarrow (L', s', i', 0', 1')$ cuando F sea un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ en $(L', s', i', 0', 1')$

Escribiremos $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1) \cong (L', s', i', 0', 1')$ cuando exista un isomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ en $(L', s', i', 0', 1')$

Lema 15. Si $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1) \rightarrow (L', s', i', 0', 1')$ es un homomorfismo biyectivo, entonces F es un isomorfismo.

Proof. Se acepta sin demostracion

□

Lema 16. Sean $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ y $(L', s', i', 0', 1')$ reticulados y sea $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1) \rightarrow (L', s', i', 0', 1')$ un homomorfismo. Entonces I_F es un subuniverso de $(L', s', i', 0', 1')$. Es decir que F es tambien un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ en $(I_F, s'|_{I_F \times I_F}, i'|_{I_F \times I_F}, 0', 1')$

Proof. Se acepta sin demostracion

□

4.3 Congruencias de reticulados acotados

Definición 26. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ un reticulado acotado. Una *congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$* sera una relacion de equivalencia θ la cual sera una congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$. Tenemos definidas sobre L/θ dos operaciones binarias $\tilde{\mathbf{s}}$ y $\tilde{\mathbf{i}}$

$$x/\theta \tilde{\mathbf{s}} y/\theta = (x \text{ s } y)/\theta$$

$$x/\theta \tilde{\mathbf{i}} y/\theta = (x \text{ i } y)/\theta$$

La 5-upla $(L/\theta, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{i}}, 0/\theta, 1/\theta)$ es llamada *cociente de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ sobre θ* y la denotaremos con $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)/\theta$

Lema 17. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ un reticulado acotado y θ una congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$.

1. $(L/\theta, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{i}}, 0/\theta, 1/\theta)$ es un reticulado acotado
2. π_θ es un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ en $(L/\theta, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{i}}, 0/\theta, 1/\theta)$ cuyo nucleo es θ

Proof. (1) Cuando hablemos de $z, w \in L/\theta$, automaticamente tendremos definidos $x, y \in L$ tal que $x/\theta = z$ y $y/\theta = w$. Demostraremos una a una las propiedades que se deben cumplir:

- $z \tilde{\mathbf{s}} z = z \tilde{\mathbf{i}} z = z$, cualesquiera sea $z \in L/\theta$, pues $x \mathbf{s} x = x \mathbf{i} x = x$
- $z \tilde{\mathbf{s}} w = w \tilde{\mathbf{s}} z$, cualesquiera sean $z, w \in L/\theta$, pues $x \mathbf{s} y = y \mathbf{s} x$
- $z \tilde{\mathbf{i}} w = w \tilde{\mathbf{i}} z$, cualesquiera sean $z, w \in L/\theta$, pues $x \mathbf{i} y = y \mathbf{i} x$
- ... Faciles de demostrar ...
- $0/\theta \tilde{\mathbf{s}} z = z$, para cada $z \in L/\theta$, pues $0 \mathbf{s} x = x$
- $1/\theta \tilde{\mathbf{s}} z = 1$, para cada $z \in L/\theta$, pues $1 \mathbf{s} x = 1$

(2) Es directo de su analogo para reticulados ternas. Capaz en un futuro lo hago □

Lema 18. Si $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1) \rightarrow (L', \mathbf{s}', \mathbf{i}', 0', 1')$ es un homomorfismo de reticulados acotados, entonces $\ker F$ es una congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$

Proof. Es directo de su analogo para reticulados ternas. Capaz en un futuro lo hago □

5 Reticulados complementados

Definición 27. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ un reticulado acotado. Dado $a \in L$, diremos que a es *complementado* cuando exista un elemento $b \in L$ (llamado *complemento de a*) tal que:

$$a \mathbf{s} b = 1$$

$$a \mathbf{i} b = 0$$

Definición 28. Entonderemos por *reticulado complementado* a una 6-upla $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, ^c, 0, 1)$ tal que $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ es un reticulado acotado y c es una operacion unaria sobre L tal que:

1. $x \mathbf{s} x^c = 1$, para cada $x \in L$
2. $x \mathbf{i} x^c = 0$, para cada $x \in L$

5.1 Subreticulados complementados

Definición 29. Dados reticulados complementados $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1)$ y $(L', s', i', c', 0', 1')$ diremos que $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1)$ es un *subreticulado complementado* de $(L', s', i', c', 0', 1')$ si se dan las siguientes condiciones:

1. $L \subseteq L'$
2. $0 = 0'$ y $1 = 1'$
3. $s = s'|_{L \times L}$
4. $i = i'|_{L \times L}$
5. ${}^c = c'|_L$

Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1)$ un reticulado complementado. Un conjunto $S \subseteq L$ es llamado un *subuniverso* de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1)$ si $0, 1 \in S$, y S es cerrado bajo las operaciones s , i y c .

5.2 Homomorfismo de reticulados complementados

Definición 30. Sean $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1)$ y $(L', s', i', c', 0', 1')$ reticulados complementados. Una funcion $F: L \rightarrow L'$ sera llamada un *homomorfismo* de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1)$ en $(L', s', i', c', 0', 1')$ si para todo $x, y \in L$ se cumple que:

$$F(x \mathbf{s} y) = F(x)s'F(y)$$

$$F(x \mathbf{i} y) = F(x)i'F(y)$$

$$F(x^c) = F(x)^{c'}$$

$$F(0) = 0'$$

$$F(1) = 1'$$

Un homomorfismo $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1)$ en $(L', s', i', c', 0', 1')$ sera llamado *isomorfismo* cuando sea biyectivo y su inversa tambien sea un homomorfismo.

Escribiremos $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1) \rightarrow (L', s', i', c', 0', 1')$ cuando F sea un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1)$ en $(L', s', i', c', 0', 1')$

Escribiremos $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1) \cong (L', s', i', c', 0', 1')$ cuando exista un isomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, {}^c, 0, 1)$ en $(L', s', i', c', 0', 1')$

Lema 19. Si $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1) \rightarrow (L', \mathbf{s}', \mathbf{i}', c', 0', 1')$ es un homomorfismo biyectivo, entonces F es un isomorfismo.

Proof. Se acepta sin demostracion □

Lema 20. Sean $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$ y $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}', c', 0', 1')$ reticulados y sea $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1) \rightarrow (L', \mathbf{s}', \mathbf{i}', c', 0', 1')$ un homomorfismo. Entonces I_F es un subuniverso de $(L', \mathbf{s}', \mathbf{i}', c', 0', 1')$. Es decir que F es tambien un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$ en $(I_F, \mathbf{s}'|_{I_F \times I_F}, \mathbf{i}'|_{I_F \times I_F}, c'|_{I_F}, 0', 1')$

Proof. Se acepta sin demostracion □

5.3 Congruencias de reticulados complementados

Definición 31. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$ un reticulado complementado. Una *congruencia sobre* $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$ sera una relacion de equivalencia θ sobre L la cual cumpla:

1. θ es una congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$
2. $x/\theta = y/\theta$ implica $x^c/\theta = y^c/\theta$

Las condiciones anteriores nos permiten definir sobre L/θ dos operaciones binarias $\tilde{\mathbf{s}}$ y $\tilde{\mathbf{i}}$ y una operacion binaria \tilde{c} de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x/\theta \tilde{\mathbf{s}} y/\theta &= (x \mathbf{s} y)/\theta \\ x/\theta \tilde{\mathbf{i}} y/\theta &= (x \mathbf{i} y)/\theta \\ (x/\theta)^{\tilde{c}} &= x^c/\theta \end{aligned}$$

La 6-upla $(L/\theta, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{i}}, \tilde{c}, 0/\theta, 1/\theta)$ es llamada *cociente de* $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$ sobre θ y la denotaremos con $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)/\theta$

Lema 21. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$ un reticulado complementado y θ una congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$.

1. $(L/\theta, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{i}}, \tilde{c}, 0/\theta, 1/\theta)$ es un reticulado complementado
2. π_θ es un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$ en $(L/\theta, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{i}}, \tilde{c}, 0/\theta, 1/\theta)$ cuyo nucleo es θ

Proof. (1) Por un lema anterior, ya sabemos que $(L/\theta, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{i}}, 0/\theta, 1/\theta)$ es un reticulado acotado. Osea solo nos falta ver que $(L/\theta, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{i}}, \tilde{c}, 0/\theta, 1/\theta)$ satisface las propiedades de reticulado complementado. Sea $x/\theta \in L/\theta$. Sabemos que $x \mathbf{s} x^c = 1$ y por lo tanto $x/\theta \tilde{\mathbf{s}} x^c/\theta = (x \mathbf{s} x^c)/\theta = 1/\theta$. Similarmente, sabemos que $x \mathbf{i} x^c = 0$ y por lo tanto $x \tilde{\mathbf{i}} x^c = 0/\theta$

(2) Por lema anterior tenemos que π_θ es un homomorfismo de $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ en $(L/\theta, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{i}}, 0/\theta, 1/\theta)$ cuyo nucleo es θ . Notese que por definicion de $\tilde{\cdot}$ tenemos que $x^c/\theta = (x/\theta)^{\tilde{c}}$, y por lo tanto $\pi_\theta(x^c) = (\pi_\theta(x))^{\tilde{c}}$, cualquiera sea $x \in L$.

□

Lema 22. Si $F: (L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1) \rightarrow (L', \mathbf{s}', \mathbf{i}', c', 0', 1')$ es un homomorfismo de reticulados complementados, entonces $\ker F$ es una congruencia sobre $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$

Proof. Se acepta sin demostracion

□

6 Algebras de Boole

Definición 32. Un reticulado $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ se llamara *distributivo* cuando cumpla la siguiente propiedad

$$Dis_1 \quad x \mathbf{i} (y \mathbf{s} z) = (x \mathbf{i} y) \mathbf{s} (x \mathbf{i} z) \text{ cualesquiera sean } x, y, z \in L$$

Diremos que un reticulado acotado $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ (resp. complementado $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}^c, 0, 1)$) es *distributivo* cuando $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ lo sea.

Consideremos la distributividad dual a Dis_1 , es decir:

$$Dis_2 \quad x \mathbf{s} (y \mathbf{i} z) = (x \mathbf{s} y) \mathbf{i} (x \mathbf{s} z) \text{ cualesquiera sean } x, y, z \in L$$

Lema 23. Sea $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ un reticulado. Entonces $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ satisface $Dis_1 \iff (L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ satisface Dis_2

Proof. Supongamos $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ satisface Dis_1 . Notese que

$$\begin{aligned} (x \mathbf{s} y) \mathbf{i} (x \mathbf{s} z) &= ((x \mathbf{s} y) \mathbf{i} x) \mathbf{s} ((x \mathbf{s} y) \mathbf{i} z) && (Dis_1 + idempotencia) \\ &= x \mathbf{s} (z \mathbf{i} (x \mathbf{s} y)) && (Dis_1) \\ &= x \mathbf{s} ((z \mathbf{i} x) \mathbf{s} (z \mathbf{i} y)) && (Conmutatividad) \\ &= (z \mathbf{i} y) \mathbf{s} ((z \mathbf{i} x) \mathbf{s} x) && (idempotencia) \\ &= (z \mathbf{i} y) \mathbf{s} x \end{aligned}$$

Por lo tanto cumple Dis_2 .

Supongamos ahora $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i})$ satisface Dis_2 . Notese que

$$\begin{aligned}
(x \mathbf{i} y) \mathbf{s} (x \mathbf{i} z) &= ((x \mathbf{i} y) \mathbf{s} x) \mathbf{i} ((x \mathbf{i} y) \mathbf{s} z) \quad (Dis_2 + idempotencia) \\
&= x \mathbf{i} (z \mathbf{s} (x \mathbf{i} y)) \quad (Dis_2) \\
&= x \mathbf{i} ((z \mathbf{s} x) \mathbf{i} (z \mathbf{s} y)) \quad (Conmutatividad) \\
&= (z \mathbf{s} y) \mathbf{i} ((z \mathbf{s} x) \mathbf{i} x) \quad (idempotencia) \\
&= (z \mathbf{s} y) \mathbf{i} x
\end{aligned}$$

Por lo tanto cumple Dis_1 . □

Definición 33. Por un *Algebra de Boole* entenderemos un reticulado complementado distributivo.

Lema 24. Si $(L, \mathbf{s}, \mathbf{i}, 0, 1)$ un reticulado acotado y distributivo, entonces todo elemento tiene a lo sumo un complemento.

Proof. Supongamos $x \in L$ tiene complementos y, z . Se tiene que:

$$\begin{aligned}
y &= y \mathbf{i} 1 = y \mathbf{i} (x \mathbf{s} z) = (y \mathbf{i} x) \mathbf{s} (y \mathbf{i} z) = 0 \mathbf{s} (y \mathbf{i} z) = y \mathbf{i} z \\
z &= z \mathbf{i} 1 = z \mathbf{i} (x \mathbf{s} y) = (z \mathbf{i} x) \mathbf{s} (z \mathbf{i} y) = 0 \mathbf{s} (z \mathbf{i} y) = z \mathbf{i} y
\end{aligned}$$

Por lo tanto $y \leq z$ y $z \leq y$, entonces $y = z$. □

Lema 25. Sea $(B, \mathbf{s}, \mathbf{i}, ^c, 0, 1)$ un algebra de Boole, y sean $x, y \in B$. Se tiene que $y = (y \mathbf{i} x) \mathbf{s} (y \mathbf{i} x^c)$

Proof. Se tiene que:

$$y = y \mathbf{i} 1 = y \mathbf{i} (x \mathbf{s} x^c) = (y \mathbf{i} x) \mathbf{s} (y \mathbf{i} x^c)$$

□

Teorema 3. Sea $(B, \mathbf{s}, \mathbf{i}, ^c, 0, 1)$ un algebra de Boole.

1. $(x \mathbf{i} y)^c = x^c \mathbf{s} y^c$
2. $(x \mathbf{s} y)^c = x^c \mathbf{i} y^c$
3. $x^{cc} = x$
4. $x \mathbf{i} y = 0 \iff y \leq x^c$
5. $x \leq y \iff y^c \leq x^c$

Proof.

(1) Veamos que $x^c \text{ s } y^c$ es complemento de $x \text{ i } y$:

$$(x^c \text{ s } y^c) \text{ s } (x \text{ i } y) = ((x^c \text{ s } y^c) \text{ s } x) \text{ i } ((x^c \text{ s } y^c) \text{ s } y) = 1 \text{ i } 1 = 1$$

$$(x^c \text{ s } y^c) \text{ i } (x \text{ s } y) = ((x^c \text{ s } y^c) \text{ i } x) \text{ s } ((x^c \text{ s } y^c) \text{ i } y) = 0 \text{ s } 0 = 0$$

Como es un algebra de Boole, se tiene que el complemento es unico y por lo tanto $(x \text{ i } y)^c = x^c \text{ s } y^c$.

(2) TODO - Ez pez igual al (1)

(3) Por definicion, x es complemento de x^c . Como tenemos un algebra de Boole, este complemento es unico y por lo tanto $x^{cc} = x$

(4) TODO - Ez pez usar lema anterior

(5) Supongamos $x \leq y$. Entonces $x \text{ i } y = x$, lo cual por (1) nos dice que $x^c \text{ s } y^c = x^c$, obteniendo $y^c \leq x^c$. Supongamos ahora $y^c \leq x^c$, luego $x^c \text{ i } y^c = y^c$, lo cual por (1) nos dice que $x^{cc} \text{ s } y^{cc} = y^{cc}$.

Esto por (3) nos dice que $x \text{ s } y = y$ y por lo tanto $x \leq y$. \square

7 Teoremas del filtro primo y de Rasiova Sikorski

Definición 34. Un *filtro* de un reticulado (L, s, i) sera un subconjunto $F \subseteq L$ tal que:

1. $F \neq \emptyset$
2. $x, y \in F \Rightarrow x \text{ i } y \in F$
3. $x \in F, x \leq y \Rightarrow y \in F$

Definición 35. Dado un conjunto $S \subseteq L$, denotemos con $[S]$ el siguiente conunto:

$$\{y \in L : y \geq s_1 \text{ i } \dots \text{ i } s_n, \text{ para algunos } s_1, \dots, s_n \in S, n \geq 1\}$$

Lema 26. Supongamos que S es no vacio. Entonces $[S]$ es un filtro. Mas aun, si F es un filtro y $S \subseteq F$, entonces $[S] \subseteq F$. Es decir, $[S]$ es el menor filtro que contiene a S .

Proof. Ya que $S \subseteq [S]$, tenemos que $[S] \neq \emptyset$.

Claramente $[S]$ cumple la propiedad (3), pues $x \in [S], x \leq y \Rightarrow y \in [S]$

Veamos que cumple la 2. Sean $y, z \in [S]$, entonces tenemos que $y \geq s_1 \text{ i } \dots \text{ i } s_n$ y $z \geq t_1 \text{ i } \dots \text{ i } t_m$, con $s_1, \dots, s_n, t_1, \dots, t_m \in S$. Claramente $y \text{ i } z \geq s_1 \text{ i } \dots \text{ i } s_n \text{ i } t_1 \text{ i } \dots \text{ i } t_m$

Dado este resultado, diremos que $[S]$ es el *filtro generado por S*. \square

Definición 36. Sea (P, \leq) un poset. Un subconjunto $C \subseteq P$ sera llamado una *cadena* si para cada $x, y \in C$ se tiene que $x \leq y$ o $y \leq x$

Lema 27 (Zorn). Sea (P, \leq) un poset y supongamos cada cadena de (P, \leq) tiene cota superior. Entonces hay un elemento maximal en (P, \leq)

Proof. Supongamos que el lema es falso, es decir, tenemos un poset (P, \leq) tal que cada cadena de (P, \leq) tiene cota superior, pero para cada $x \in P$, se tiene que existe un $y \in P$ tal que $x < y$.

Por definicion $P \neq \emptyset$, (en caso de que se permitiese $P = \emptyset$, de todas formas la cadena vacia debe tener cota superior, y por lo tanto $P \neq \emptyset$)

Sea $z \in P$ un elemento cualquiera, y sea b una funcion que asigna a cada cadena de P un elemento mayor a su cota superior (cota superior estricta). En particular elegimos b tal que $b(\{z\}) = z$

Definimos una cadena $A \subseteq P$ como *valida* cuando se cumpla la siguiente propiedad:

- Para todo $x \in A$, se tiene que $x = b(\{y \in A : y < x\})$

Es facil ver que si A y B son dos cadenas *validas* distintas, entonces $A \subset B$ o $B \subset A$

Con esta ultima afirmacion, si tenemos una cadena valida A y un $x \in A$, siempre que exista un $y < x$, se tiene que $y \in A$ o y no esta en ninguna cadena valida.

Se sigue que $U =$ "union de todas las cadenas *validas* posibles", es tambien, una cadena *valida*.

Sea $x = b(U)$. Pero entonces $U \cup \{x\}$ es una *cadena* valida tambien. Ademas $U = U \cup \{x\}$ por definicion de U , y por lo tanto $x \in U$. **Abst!**, pues x deberia ser cota superior estricta de U \square

Definición 37. Un filtro F de un reticulado (L, s, i) sera llamado *primo* cuando se cumplan:

1. $F \neq L$
2. $x \text{ s } y \in F \Rightarrow x \in F \text{ o } y \in F$

Teorema 4 (Teorema del Filtro Primo). Sea (L, s, i) un reticulado distributivo y F un filtro. Supongamos $x_0 \in L - F$. Entonces hay un filtro primo P tal que $x_0 \notin P$ y $F \subseteq P$

Proof. Sea

$$\mathcal{F} = \{F_1 : F_1 \text{ es un filtro, } x_0 \notin F_1 \text{ y } F \subseteq F_1\}$$

Notese que $\mathcal{F} \neq \emptyset$, por lo cual (\mathcal{F}, \subseteq) es un poset. Veamos que cada cadena en (\mathcal{F}, \subseteq) tiene cota superior. Sea C una cadena. Si $C = \emptyset$, entonces cualquier elemento de \mathcal{F} es cota de C . Supongamos entonces $C \neq \emptyset$. Sea

$$G = \{x \in L : x \in F_1, \text{ para algun } F_1 \in C\}$$

Veamos que G es un filtro. Es claro que G es no vacío. Supongamos $x, y \in G$. Sean $F_1, F_2 \in \mathcal{F}$ tales que $x \in F_1$ y $y \in F_2$. Si $F_1 \subseteq F_2$, entonces ya que F_2 es un filtro, tenemos que $x \mathbf{i} y \in F_2 \subseteq G$. Similarmente, si $F_2 \subseteq F_1$, entonces $x \mathbf{i} y \in F_1 \subseteq G$. No es necesario ver que pasa si $F_1 \not\subseteq F_2$ y $F_2 \not\subseteq F_1$ ya que C es una cadena.

Por otro lado, sean $x \in G$ e y tal que $x \leq y$. Dado que $x \in G$, tenemos que $x \in F_1$ para algun $F_1 \in C$. Como F_1 es un filtro, tenemos que $y \in F_1$, y por lo tanto $y \in G$. Hemos demostrado que G es un filtro.

Ademas, $x_0 \notin G$, por lo que $G \in \mathcal{F}$ es cota superior de C . Por lema de Zorn, (\mathcal{F}, \subseteq) tiene un elemento maximal P . Veamos que P es un filtro primo. Supongamos $x \mathbf{s} y \in P$ y $x, y \notin P$. Notese que $[P \cup \{x\}]$ es un filtro el cual contiene propiamente a P . Entonces ya que P es maximal de (\mathcal{F}, \subseteq) , tenemos que $x_0 \in [P \cup \{x\}]$. Analogamente tenemos que $x_0 \in [P \cup \{y\}]$. Por lo tanto, tenemos elementos $p_1, \dots, p_n \in P$ tal que:

$$x_0 \geq p_1 \mathbf{i} \dots \mathbf{i} p_n \mathbf{i} x$$

Identicamente tenemos elementos $q_1, \dots, q_m \in P$ tales que:

$$x_0 \geq q_1 \mathbf{i} \dots \mathbf{i} q_m \mathbf{i} y$$

Sea $p = p_1 \mathbf{i} \dots \mathbf{i} p_n \mathbf{i} q_1 \mathbf{i} \dots \mathbf{i} q_m$, tenemos que $x_0 \geq p \mathbf{i} x$ y $x_0 \geq p \mathbf{i} y$. Se tiene entonces que $x_0 \geq (p \mathbf{i} x) \mathbf{s} (p \mathbf{i} y) = p \mathbf{i} (x \mathbf{s} y) \in P$. **Abs!** pues $x_0 \notin P$ □

Teorema 5 (Rasiova y Sikorski). Sea $(B, \mathbf{s}, \mathbf{i}, ^c, 0, 1)$ un algebra de Boole. Sea $x \in B, x \neq 0$. Supongamos que (A_1, A_2, \dots) es un infinitupla de subconjuntos de B tal que existe $\inf(A_j)$, para cada $j = 1, 2, \dots$. Entonces hay un filtro primo P el cual cumple:

1. $x \in P$
2. $A_j \subseteq P \Rightarrow \inf(A_j) \in P$, para cada $j = 1, 2, \dots$

Proof. Se acepta sin demostracion □

8 Sintaxis de la logica de primer orden

8.1 Ocurrencias

Definición 38. Dadas palabras $\alpha, \beta \in \Sigma^*$, con $|\alpha|, |\beta| \geq 1$, y un natural $i \in \{1, \dots, |\beta|\}$, se dice que α ocurre a partir de i en β cuandos se de que existan palabras δ, γ tales que $\beta = \delta\alpha\gamma$ y $|\delta| = i - 1$

Notese que una palabra α puede ocurrir en β a partir de i y tambien a partir de j , con $i \neq j$. Por ejemplo, *aba* ocurre dos veces en la palabra

abacaba

Cuando dos ocurrencias no se superpongan en alguna posicion, se las llamara *disjuntas*

A veces, diremos que una ocurrencia esta *contenida* o *sucede* dentro de otra. Por ejemplo, la segunda ocurrencia de *b* esta contenida en la segunda ocurrencia de *aba*

Tambien se podra hablar de *reemplazos* de ocurrencias por palabras. Por ejemplo, podriamos reemplazar las ocurrencias de *aca* por *abacaba*, dando como resultado

ababacababa

En algunos casos, se debera especificar que los reemplazos se haran *simultaneamente* en vez de *secuencialmente*. Por ejemplo, no es lo mismo primero reemplazar *aca* por *d* y luego *d* por *bb*

abbbba

Que hacerlo simultaneamente dando como resultado

abdba

Definición 39. Diremos que α es subpalabra (propia) de β cuando ($\alpha \notin \{\varepsilon, \beta\}$ y) existan palabras δ, γ , tales que $\beta = \delta\alpha\gamma$

Definición 40. Diremos que β es un *tramo inicial (propio)* de α si hay una palabra de γ tal que $\alpha = \beta\gamma$ (y $\beta \notin \{\varepsilon, \alpha\}$). En forma similar se define *tramo final (propio)*

8.2 Variables

Definición 41. Sea *Var* el siguiente conjunto de palabras del alfabeto $\{X, 0, 1, \dots, 9, \mathbf{0}, \mathbf{1}, \dots, \mathbf{9}\}$:

$$Var = \{X\mathbf{0}, \dots, X\mathbf{9}, X1\mathbf{0}, \dots, X2\mathbf{0}, \dots, X10\mathbf{0}, \dots\}$$

Es decir, el n -esimo elemento de *Var* sera la palabra de la forma $X\alpha$, donde α es el resultado de reemplazar en la representacion decimal de n su ultimo simbolo por el numeral en bold, y el resto por sus numerales en italics.

A los elementos de *Var* se los llamara *variables*.

Denotaremos con x_i al i -esimo elemento de *Var*, para cada $i \in \mathbf{N}$.

8.3 Tipos

Definición 42. Por un tipo (de primer orden) entenderemos una 4-upla $\tau = (\mathcal{C}, \mathcal{F}, \mathcal{R}, a)$ tal que:

1. Hay alfabetos finitos $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ tales:

$$(a) \ \mathcal{C} \subseteq \Sigma_1^+, \mathcal{F} \subseteq \Sigma_2^+, \mathcal{R} \subseteq \Sigma_3^+$$

(b) $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ son disjuntos de a pares

(c) $\Sigma_1 \cup \Sigma_2 \cup \Sigma_3$ no contiene ningun simbolo de la lista: $\forall \ \exists \ \neg \ \vee \ \wedge \ \rightarrow \leftrightarrow \ (\) \ , \ \equiv$
 $X \ 0 \ 1 \ \dots \ 9 \ 0 \ 1 \ \dots \ 9$

2. $a: \mathcal{F} \cup \mathcal{R} \rightarrow \mathbf{N}$ es una funcion que a cada $p \in \mathcal{F} \cup \mathcal{R}$ le asocia un numero natural $a(p)$, llamado la *aridad* de p

3. Ninguna palabra de \mathcal{C} (resp. \mathcal{F}, \mathcal{R}) es subpalabra propia de otra palabra de \mathcal{C} (resp. \mathcal{F}, \mathcal{R})

A los elementos de \mathcal{C} (resp. \mathcal{F}, \mathcal{R}) los llamaremos *nombres de constante* (resp. *nombres de funcion, nombres de relacion*) de tipo τ

Dado $n \geq 1$, definamos

$$\mathcal{F}_n = \{f \in \mathcal{F} : a(f) = n\}$$

$$\mathcal{R}_n = \{r \in \mathcal{R} : a(r) = n\}$$

8.4 Terminos

Dado un tipo τ , definamos recursivamente los conjuntos de palabras T_k^τ , con $k \geq 0$, de la siguiente manera:

$$T_0^\tau = Var \cup \mathcal{C}$$

$$T_{k+1}^\tau = T_k^\tau \cup \{f(t_1, \dots, t_n) : f \in \mathcal{F}_n, n \geq 1, t_1, \dots, t_n \in T_k^\tau\}$$

Sea

$$T^\tau = \bigcup_{k \geq 0} T_k^\tau$$

Los elementos de T^τ seran llamados *terminos de tipo τ* . Un termino t es llamado *cerrado* si x_i no ocurre en t , para cada $i \in \mathbf{N}$.

Definimos tambien:

$$T_c^\tau = \{t \in T^\tau : t \text{ es cerrado}\}$$

Lema 28. Supongamos $t \in T_k^\tau$, con $k \geq 1$. Entonces ya sea $t \in Var \cup \mathcal{C}$ o $t = f(t_1, \dots, t_n)$, con $f \in \mathcal{F}_n, n \geq 1, t_1, \dots, t_n \in T_{k-1}^\tau$

Proof.

Caso $k = 1$: Es directo ya que por definicion:

$$T_1^\tau = Var \cup \mathcal{C} \cup \{f(t_1, \dots, t_n) : f \in \mathcal{F}_n, n \geq 1, t_1, \dots, t_n \in T_0^\tau\}$$

Caso $k \implies k + 1$. Sea $t \in T_{k+1}^\tau$. Por definicion tenemos que $t \in T_k^\tau$ o $t = f(t_1, \dots, t_n)$ con $f \in \mathcal{F}_n, n \geq 1, t_1, \dots, t_n \in T_k^\tau$. Si se da $t \in T_k^\tau$ entonces aplicamos hipotesis inductiva. Si no se da tal cosa, entonces es justamente lo que nos dice el enunciado del lema. \square

8.4.1 Unicidad de la lectura de terminos

Lema 29 (Mordizqueo de Terminos). Sean $s, t \in T^\tau$ y supongamos que hay palabras x, y, z , con $y \neq \varepsilon$ tales que $s = xy$ y $t = yz$. Entonces $x = z = \varepsilon$ o $s, t \in \mathcal{C}$. En particular si un termino es tramo inicial o final de otro termino, entonces dichos terminos son iguales.

Proof. Se acepta sin demostracion \square

Teorema 6 (Lectura unica de terminos). Dado $t \in T^\tau$ se da una de las siguientes:

1. $t \in Var \cup \mathcal{C}$
2. Hay unicos $n \geq 1, f \in \mathcal{F}_n, t_1, \dots, t_n \in T^\tau$ tales que $t = f(t_1, \dots, t_n)$

Proof. Solo necesitamos demostrar la unicidad del punto 2, el resto ya se demostro. Supongamos que

$$t = f(t_1, \dots, t_n) = g(s_1, \dots, s_m)$$

con $n, m \geq 1, f \in \mathcal{F}_n, g \in \mathcal{F}_m, t_1, \dots, t_n, s_1, \dots, s_m \in T^\tau$. Claramente $f = g$ y por lo tanto $n = m = a(f)$. Ahora bien, si leemos letra por letra apartir del primer parentesis ‘(’, terminara primero t_1 o s_1 , pero nunca deben diferir entre si. Esto nos dice que t_1 es tramo inicial de s_1 o viceversa. Por lema anterior, $t_1 = s_1$. Con el mismo razonamiento podemos demostrar que se cumple $t_2 = s_2, \dots, t_n = s_n$ \square

8.4.2 Subterminos

Definición 43. Sean $s, t \in T^\tau$. Diremos que s es *subtermino (propio)* de t si (no es igual a t y) s es subpalabra de t .

Lema 30. Sean $r, s, t \in T^\tau$

1. Si $s \neq t = f(t_1, \dots, t_n)$ y s ocurre en t , entonces dicha ocurrencia sucede dentro de algun t_j , $j = 1, \dots, n$
2. Si r, s ocurren en t , entonces dichas ocurrencias son disjuntas o una ocurre dentro de otra. En particular las distintas ocurrencias de r en t son disjuntas
3. Si t' es el resultado de reemplazar una ocurrencia de s en t por r , entonces $t' \in T^\tau$

Proof.

(1) Haremos analisis por casos:

- Si s ocurriera en t a partir de $i \in \{1, \dots, |f|\}$, entonces tenemos que s es de la forma $g(s_1, \dots, s_m)$ (no puede ser ni *Var* ni *C*), y por lo tanto g es tramo final de f **Abs!**
- Es claro que s no comienza ni con "(", ni con ")", ni con "(" ni con ")"
- Solo queda el caso en el que la ocurrencia de s comienza en algun t_j . (Fotocopia dice \rightarrow Lema de Mordizqueo para Terminos nos conduce a que debe estar contenida en t_j y listo, pero yo soy menos picante y no entiendo porque)

Supongamos que la ocurrencia no esta contenida en t_j , y sea t_k ($j < k$) el ultimo termino que forma parte de la ocurrencia (aunque sea parcialmente).

Es evidente que este k existe, pues la ocurrencia de s no puede tomar el ultimo parentesis de t , sino, seria tramo final de t y podriamos aplicar Lema de Mordizqueo para terminos directamente. Ademas, s no puede terminar con una "(", "

Sea $n = |t_j|$ y $m = |t_k|$. Se usara la notacion $p[i]$ para referirse a la letra i -esima de p .

Tenemos entonces que $s = t_j[l] \dots t_j[n], t_{j+1}, \dots, t_{k-1}, t_k[1] \dots t_k[r]$ Notese que hay una coma justo despues de $t_j[n]$, por lo tanto apartir de algun $i \in \{l, \dots, n\}$ debe comenzar el nombre de una funcion. Esta funcion no cierra su parentesis dentro de t_j . Es importante notar que los parentesis se cierran a la derecha, no a la izquierda, osea que no nos importa la parte $t_j[1] \dots t_j[l-1]$, y por lo tanto esto nos dice que los parentesis en t_j no estan balanceados **Abs!**

□

8.5 Formulas

Definición 44. Sea τ un tipo. Las palabras de alguna de las siguientes dos formas:

$$(t \equiv s), \text{ con } t, s \in T^\tau$$

$$r(t_1, \dots, t_n), \text{ con } r \in \mathcal{R}_n, n \geq 1, \text{ y } t_1, \dots, t_n \in T^\tau$$

seran llamadas *formulas atomicas de tipo τ*

Definición 45. Dado un tipo τ definamos recursivamente los conjuntos de palabras F_k^τ , con $k \geq 0$, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} F_0^\tau &= \{\text{formulas atomicas}\} \\ F_{k+1}^\tau &= F_k^\tau \cup \{\neg\varphi : \varphi \in F_k^\tau\} \cup \{(\varphi \vee \psi) : \varphi, \psi \in F_k^\tau\} \cup \{(\varphi \wedge \psi) : \varphi, \psi \in F_k^\tau\} \\ &\quad \cup \{(\varphi \rightarrow \psi) : \varphi, \psi \in F_k^\tau\} \cup \{(\varphi \leftrightarrow \psi) : \varphi, \psi \in F_k^\tau\} \\ &\quad \cup \{\forall v\varphi : \varphi \in F_k^\tau, v \in \text{Var}\} \cup \{\exists v\varphi : \varphi \in F_k^\tau, v \in \text{Var}\} \end{aligned}$$

Sea

$$F^\tau = \bigcup_{k \geq 0} F_k^\tau$$

Los elementos de F^τ seran llamados *formulas de tipo τ*

Lema 31. Supongamos $\varphi \in F_k^\tau$, con $k \geq 1$. Entonces φ es de alguna de las siguientes formas:

- $(t \equiv s)$, con $t, s \in T^\tau$
- $r(t_1, \dots, t_n)$, con $r \in \mathcal{R}_n, t_1, \dots, t_n \in T^\tau$
- $(\varphi_1 \eta \varphi_2)$, con $\eta \in \{\wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow\}$, $\varphi_1, \varphi_2 \in F_{k-1}^\tau$
- $\neg\varphi_1$, con $\varphi_1 \in F_{k-1}^\tau$
- $Qv\varphi_1$, con $Q \in \{\forall, \exists\}, v \in \text{Var}$ y $\varphi_1 \in F_{k-1}^\tau$

Proof. TODO □

8.5.1 Unicidad de la lectura de formulas

Proposición 1 (Mordizqueo de formulas). Si $\varphi, \psi \in F^\tau$ y x, y, z son tales que $\varphi = xy$, $\psi = yz$ y $y \neq \varepsilon$, entonces $z = \varepsilon$ y $x \in (\{\neg\} \cup \{Qv : Q \in \{\forall, \exists\} \text{ y } v \in \text{Var}\})^*$. En particular ningun tramo inicial propio de una formula es una formula

Proof. Se acepta sin demostracion

□

Teorema 7 (Lectura unica de formulas). *Dada $\varphi \in F^\tau$ se da una y solo una de las siguientes:*

- $(t \equiv s)$, con $t, s \in T^\tau$
- $r(t_1, \dots, t_n)$, con $r \in \mathcal{R}_n, t_1, \dots, t_n \in T^\tau$
- $(\varphi_1 \eta \varphi_2)$, con $\eta \in \{\wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow\}$, $\varphi_1, \varphi_2 \in F^\tau$
- $\neg \varphi_1$, con $\varphi_1 \in F^\tau$
- $Qv\varphi_1$, con $Q \in \{\forall, \exists\}, v \in Var$ y $\varphi_1 \in F^\tau$

Proof. TODO

□

8.5.2 Subformulas

Definición 46. Una formula φ sera llamada una *subformula (propia)* de una formula ψ , cuando φ (sea no igual a ψ y) tenga alguna ocurrencia en ψ .

Lema 32. *Sea τ un tipo*

1. *Las formulas atomicas no tienen subformulas propias*
2. *Si φ ocurre propiamente en $(\psi\eta\phi)$, entonces tal ocurrencia es en ψ o en ϕ*
3. *Si φ ocurre propiamente en $\neg\psi$, entonces tal ocurrencia es en ψ*
4. *Si φ ocurre propiamente en $Qx_k\psi$, entonces tal ocurrencia es en ψ*
5. *Si φ_1, φ_2 ocurren en φ , entonces dichas ocurrencias son disjuntas o una contiene a la otra*
6. *Si λ' es el resultado de reemplazar alguna ocurrencia de φ en λ por ψ , entonces $\lambda' \in F^\tau$*

Proof. Se acepta sin demostracion

□

8.6 Variables libres

Definición 47. Definimos recursivamente la relacion "*v ocurre libremente en φ a partir de i* ", donde $v \in Var, \varphi \in F^\tau$ y $i \in \{1, \dots, |\varphi|\}$ de la siguiente manera:

1. Si φ es atomica, entonces v ocurre libremente en φ a partir de $i \iff v$ ocurre en φ a partir de i
2. Si $\varphi = (\varphi_1 \eta \varphi_2)$, entonces v ocurre libremente en φ a partir de $i \iff v$ ocurre libremente en φ_1 a partir de $i - 1$ o v ocurre libremente en φ_2 a partir de $i - |(\varphi_1 \eta)|$
3. Si $\varphi = \neg \varphi_1$, entonces v ocurre libremente en φ a partir de $i \iff v$ ocurre libremente en φ_1 a partir de $i - 1$
4. Si $\varphi = Qw\varphi_1$, entonces v ocurre libremente en φ a partir de $i \iff v \neq w$ y v ocurre libremente en φ_1 a partir de $i - |Qw|$

Dados $v \in Var$, $\varphi \in F^\tau$ y $i \in \{1, \dots, |\varphi|\}$, diremos que " v ocurre acotadamente en φ a partir de i " cuando v ocurre en φ a partir de i y v no ocurre libremente en φ a partir de i

Definición 48. Dada una formula φ , sea

$$Li(\varphi) = \{v \in Var : \text{hay un } i \text{ tal que } v \text{ ocurre libremente en } \varphi \text{ a partir de } i\}$$

Los elementos de $Li(\varphi)$ serán llamados *variables libres de φ* . Una *sentencia* será una formula φ tal que $Li(\varphi) = \emptyset$. Usaremos S^τ para denotar el conjunto de las sentencias de tipo τ .

Lema 33. Sea τ un tipo

1. $Li((t \equiv s)) = \{v \in Var : v \text{ ocurre en } t \text{ o } v \text{ ocurre en } s\}$
2. $Li(r(t_1, \dots, t_n)) = \{v \in Var : v \text{ ocurre en algun } t_i\}$
3. $Li(\neg \varphi) = Li(\varphi)$
4. $Li((\varphi \eta \psi)) = Li(\varphi) \cup Li(\psi)$
5. $Li(Qx_j \varphi) = Li(\varphi) - \{x_j\}$

Proof. TODO □

9 Semantica de la logica de primer orden

9.1 Estructuras de tipo τ

Definición 49. Sea A un conjunto y sea $n \in \mathbf{N}$. Por una *operacion n -aria sobre A* , entenderemos una funcion cuyo dominio es A^n y cuya imagen esta contenida en A .

Definición 50. Sea A un conjunto y sea $n \in \mathbf{N}$. Por una *relacion n -aria sobre A* entenderemos un subconjunto de A^n .

Definición 51. Sea A un conjunto, $n \in \mathbf{N}$ y τ un tipo. Una *estructura o modelo de tipo τ* sera un par $\mathbf{A} = (A, i)$ tal que:

1. A es un conjunto no vacio llamado el *universo* de \mathbf{A}
2. i es una funcion con dominio $\mathcal{C} \cup \mathcal{F} \cup \mathcal{R}$ tal que:
 - (a) para cada $c \in \mathcal{C}$, $i(c)$ es un elemento de A
 - (b) para cada $f \in \mathcal{F}_n$, $i(f)$ es una operacion n -aria sobre A
 - (c) para cada $r \in \mathcal{R}_n$, $i(r)$ es una relacion n -aria sobre A

Lema 34. *Dados A, B conjuntos finitos no vacios, hay $|B|^{|A|}$ funciones tales que su dominio es A y su imagen esta contenida en B .*

Proof. TODO □

9.2 El valor de un termino de una estructura

Definición 52. Sea $\mathbf{A} = (A, i)$ una estructura de tipo τ . Una *asignacion* de \mathbf{A} sera un elemento de $A^{\mathbf{N}} = \{\text{infinituplas de elementos de } A\}$. Si $\vec{a} = (a_1, a_2, \dots)$ es una asignacion, entonces diremos que a_j es el valor que \vec{a} le asigna a la variable x_j

Definición 53. Sea $\mathbf{A} = (A, i)$ una estructura de tipo τ , $t \in T^\tau$ y $\vec{a} \in A^{\mathbf{N}}$ una asignacion, definimos recursivamente $t^{\mathbf{A}}[\vec{a}]$:

1. Si $t = x_i \in \text{Var}$, entonces $t^{\mathbf{A}}[\vec{a}] = a_i$
2. Si $t = c \in \mathcal{C}$, entonces $t^{\mathbf{A}}[\vec{a}] = i(c)$
3. Si $t = f(t_1, \dots, t_n)$ con $f \in \mathcal{F}_n, n \geq 1$ y $t_1, \dots, t_n \in T^\tau$, entonces $t^{\mathbf{A}}[\vec{a}] = i(f)(t_1^{\mathbf{A}}[\vec{a}], \dots, t_n^{\mathbf{A}}[\vec{a}])$

El elemento $t^{\mathbf{A}}[\vec{a}]$ sera llamado el *valor de t en la estructura \mathbf{A} para la asignacion \vec{a}*

Lema 35. *Sea \mathbf{A} una estructura de tipo τ y sea $t \in T^\tau$. Supongamos que \vec{a}, \vec{b} son asignaciones tales que $a_i = b_i$, cada vez que x_i ocurra en t . Entonces $t^{\mathbf{A}}[\vec{a}] = t^{\mathbf{A}}[\vec{b}]$*

Proof. TODO □

9.3 El valor de verdad de una formula en un estructura

Definición 54. Sea $\vec{a} \in A^N$ una asignacion y $a \in A$, denotaremos con $\downarrow_i^a(\vec{a})$ a la asignacion que resulta de reemplazar en \vec{a} el i -esimo elemento por a .

Definición 55. Sea \mathbf{A} una estructura de tipo τ , $\vec{a} \in A^N$ una asignacion y $\varphi \in F^\tau$, definimos entonces recursivamente la relacion $A \models \varphi[\vec{a}]$ (escribiremos $A \not\models \varphi[\vec{a}]$ cuando no se de $A \models \varphi[\vec{a}]$):

1. Si $\varphi = (t \equiv s)$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff t^{\mathbf{A}}[\vec{a}] = s^{\mathbf{A}}[\vec{a}]$
2. Si $\varphi = r(t_1, \dots, t_m)$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff (t_1^{\mathbf{A}}[\vec{a}], \dots, t_m^{\mathbf{A}}[\vec{a}]) \in i(r)$
3. Si $\varphi = (\varphi_1 \wedge \varphi_2)$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff \mathbf{A} \models \varphi_1[\vec{a}]$ y $\mathbf{A} \models \varphi_2[\vec{a}]$
4. Si $\varphi = (\varphi_1 \vee \varphi_2)$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff \mathbf{A} \models \varphi_1[\vec{a}]$ o $\mathbf{A} \models \varphi_2[\vec{a}]$
5. Si $\varphi = (\varphi_1 \rightarrow \varphi_2)$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff \mathbf{A} \models \varphi_2[\vec{a}]$ o $\mathbf{A} \not\models \varphi_1[\vec{a}]$
6. Si $\varphi = (\varphi_1 \leftrightarrow \varphi_2)$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff$ ya sea se dan $\mathbf{A} \models \varphi_1[\vec{a}]$ y $\mathbf{A} \models \varphi_2[\vec{a}]$ o se dan $\mathbf{A} \not\models \varphi_1[\vec{a}]$ y $\mathbf{A} \not\models \varphi_2[\vec{a}]$
7. Si $\varphi = \neg \varphi_1$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff \mathbf{A} \not\models \varphi_1[\vec{a}]$
8. Si $\varphi = \forall x_i \varphi_1$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff$ para cada $a \in A$, se da que $\mathbf{A} \models \varphi_1[\downarrow_i^a(\vec{a})]$
9. Si $\varphi = \exists x_i \varphi_1$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff$ hay un $a \in A$ tal que $\mathbf{A} \models \varphi_1[\downarrow_i^a(\vec{a})]$

Cuando se de $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}]$ diremos que la *estructura \mathbf{A} satisface φ en la asignacion \vec{a}* y en tal caso diremos que *φ es verdadera en \mathbf{A} para la asignacion \vec{a}* .

Cuando se de $\mathbf{A} \not\models \varphi[\vec{a}]$ diremos que la *estructura \mathbf{A} no satisface φ en la asignacion \vec{a}* y en tal caso diremos que *φ es falsa en \mathbf{A} para la asignacion \vec{a}* .

Tambien hablaremos del *valor de verdad de φ en \mathbf{A} para la asignacion \vec{a}* el cual sera igual a 1 si se da $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}]$ y 0 en caso contrario.

Lema 36. Supongamos que \vec{a}, \vec{b} son asignaciones tales que si $x_i \in Li(\varphi)$, entonces $a_i = b_i$. Entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff \mathbf{A} \models \varphi[\vec{b}]$

Proof. TODO □

Corolario 1. Si φ es una sentencia, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff \mathbf{A} \models \varphi[\vec{b}]$, cualesquiera sean las asignaciones \vec{a}, \vec{b}

Definición 56. Dada una sentencia φ , diremos que φ es *verdadera* en \mathbf{A} cuando su valor de verdad sea 1, y, en caso de que su valor de verdad sea 0, diremos que es *falsa*

Ademas una sentencia de tipo τ sera llamada *universalmente valida* si es verdadera en cada modelo de tipo τ

9.4 Equivalencia de formulas

Definición 57. Dadas $\varphi, \psi \in F^\tau$ diremos que φ y ψ son *equivalentes* cuando se de la siguiente condicion:

$$\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff \mathbf{A} \models \psi[\vec{a}], \text{ para cada modelo de tipo } \tau, \mathbf{A} \text{ y cada } \vec{a} \in A^{\mathbf{N}}$$

Escribiremos $\varphi \sim \psi$ cuando φ y ψ sean equivalentes. Notese que \sim es una relacion de equivalencia.

Lema 37. Son validas las siguientes propiedades:

1. Si $Li(\phi) \cup Li(\psi) \subseteq \{x_{i_1}, \dots, x_{i_n}\}$, entonces $\phi \sim \psi \iff$ la sentencia $\forall x_{i_1}, \dots, \forall x_{i_n}(\phi \leftrightarrow \psi)$ es universalmente valida
2. Si $\phi_i \sim \psi_i, i = 1, 2$, entonces $\neg\phi_1 \sim \neg\psi_1, (\phi_1 \wedge \phi_2) \sim (\psi_1 \wedge \psi_2)$ y $Qv\phi_1 \sim Qv\psi_1$
3. Si $\phi \sim \psi$ y α' es el resultado de reemplazar en una formula α algunas (posiblemente 0) ocurrencias de ϕ por ψ , entonces $\alpha \sim \alpha'$

Proof. TODO □

9.5 Homomorfismos

Definición 58. Dado un modelo de tipo τ , $\mathbf{A} = (A, i)$, para cada $s \in \mathcal{C} \cup \mathcal{F} \cup \mathcal{R}$, usaremos $s^{\mathbf{A}}$ para denotar a $i(s)$.

Definición 59. Sean \mathbf{A}, \mathbf{B} modelos de tipo τ . Una funcion $F: A \rightarrow B$ sera un *homomorfismo* de \mathbf{A} en \mathbf{B} si se cumplen las siguientes:

1. $F(c^{\mathbf{A}}) = c^{\mathbf{B}}$, para todo $c \in \mathcal{C}$
2. $F(f^{\mathbf{A}}(a_1, \dots, a_n)) = f^{\mathbf{B}}(F(a_1), \dots, F(a_n))$, para cada $f \in \mathcal{F}_n, a_1, \dots, a_n \in A$
3. $a_1, \dots, a_n \in r^{\mathbf{A}}$ implica $(F(a_1), \dots, F(a_n)) \in r^{\mathbf{B}}$, para todo $r \in \mathcal{R}_n, a_1, \dots, a_n \in A$

Un *isomorfismo de \mathbf{A} en \mathbf{B}* sera un homomorfismo de \mathbf{A} en \mathbf{B} el cual sea biyectivo y cuya inversa sea un homomorfismo de \mathbf{B} en \mathbf{A} . Diremos que los modelos \mathbf{A} y \mathbf{B} son *isomorfos* (en simbolos: $\mathbf{A} \cong \mathbf{B}$) cuando haya un isomorfismo F de \mathbf{A} en \mathbf{B} .

Diremos que $F: \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{B}$ es un *homomorfismo* para expresar que F es un homomorfismo de \mathbf{A} en \mathbf{B} .

Diremos que $F: \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{B}$ es un *isomorfismo* para expresar que F es un isomorfismo de \mathbf{A} en \mathbf{B} .

Lema 38. Sea $F: \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{B}$ un homomorfismo. Entonces

$$F(t^{\mathbf{A}}[(a_1, a_2, \dots)]) = t^{\mathbf{B}}[(F(a_1), F(a_2), \dots)]$$

para cada $t \in T^\tau, (a_1, a_2, \dots) \in A^{\mathbf{N}}$

Lema 39. Supongamos que $F: \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{B}$ es un isomorfismo. Sea $\varphi \in F^\tau$. Entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[(a_1, a_2, \dots)] \iff \mathbf{B} \models \varphi[(F(a_1), F(a_2), \dots)]$$

para cada $(a_1, a_2, \dots) \in A^{\mathbf{N}}$. En particular \mathbf{A} y \mathbf{B} satisfacen las mismas sentencias de tipo τ .

Proof. TODO □

10 Notacion declaratoria para terminos

Definición 60. Sea t un termino de tipo τ , entonces escribiremos $t =_d t(v_1, \dots, v_n)$ para declarar que v_1, \dots, v_n son variables distintas tales que toda variable que ocurre en t pertenece a $\{v_1, \dots, v_n\}$

Convencion 1. Cuando hayamos hecho la declaracion $t =_d t(v_1, \dots, v_n)$, si P_1, \dots, P_n son palabras cualesquiera, entonces $t(P_1, \dots, P_n)$ denotara la palabra que resulta de reemplazar simultaneamente cada ocurrencia de v_1 por P_1 , ..., cada ocurrencia de v_n por P_n

Convencion 2. Cuando hayamos declarado $t =_d t(v_1, \dots, v_n)$, si \mathbf{A} es un modelo de tipo τ y $a_1, \dots, a_n \in A$, entonces con $t^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n]$ denotaremos al elemento $t^{\mathbf{A}}[\vec{b}]$, donde \vec{b} es una asignacion tal que a cada v_i le asigna el valor a_i

Lema 40. Sea τ un tipo cualquiera y supongamos $t \in T^\tau$. Si $t =_d t(v_1, \dots, v_n)$, entonces se da alguna de las siguientes:

1. $t = c$, para algun $c \in C$

2. $t = v_j$, para algun j

3. $t = f(t_1, \dots, t_m)$, con $f \in \mathcal{F}_m$ y $t_1, \dots, t_m \in T^\tau$ tales que las variables que ocurren en cada uno de ellos estan en $\{v_1, \dots, v_n\}$

Convencion 3. Cuando hayamos declarado $t =_d t(v_1, \dots, v_n)$ y se de el caso (3) del lema anterior, tendremos hechas las declaraciones $t_1 =_d t_1(v_1, \dots, v_n), \dots, t_m =_d t_m(v_1, \dots, v_n)$

Lema 41. Sea τ un tipo cualquiera y $t \in T^\tau$. Supongamos $t =_d t(v_1, \dots, v_n)$. Sea \mathbf{A} un modelo de tipo τ . Sean $a_1, \dots, a_n \in A$. Se tiene que:

1. Si $t = c$, entonces $t^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n] = c^{\mathbf{A}}$

2. Si $t = v_j$, entonces $t^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n] = a_j$

3. Si $t = f(t_1, \dots, t_m)$, con $f \in \mathcal{F}_m$ y $t_1, \dots, t_m \in T^\tau$, entonces

$$t^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n] = f^{\mathbf{A}}(t_1^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n], \dots, t_m^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n])$$

11 Notacion declaratoria para formulas

Definición 61. Si φ es una formula de tipo τ , entonces escribiremos $\varphi =_d \varphi(v_1, \dots, v_n)$ para declarar que v_1, \dots, v_n son variables distintas tales que $Li(\varphi) \subseteq \{v_1, \dots, v_n\}$.

Convencion 4. Cuando hayamos hecho la declaracion $\varphi =_d \varphi(v_1, \dots, v_n)$, si P_1, \dots, P_n son palabras cualesquiera, entonces $\varphi(P_1, \dots, P_n)$ denotaria la palabra que resulta de reemplazar simultaneamente cada ocurrencia libre de v_1 en φ por P_1 , ..., cada ocurrencia libre de v_n en φ por P_n

Convencion 5. Cuando hayamos declarado $\varphi =_d \varphi(v_1, \dots, v_n)$, si \mathbf{A} es un modelo de tipo τ y $a_1, \dots, a_n \in A$, entonces $\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n]$ significara que $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{b}]$, donde \vec{b} es una asignacion tal que a cada v_i le asigna el valor a_i . En general, $\mathbf{A} \not\models \varphi[a_1, \dots, a_n]$ significara que no sucede $\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n]$

Lema 42. Sea τ un tipo cualquiera y $\varphi \in F^\tau$. Supongamos $\varphi =_d \varphi(v_1, \dots, v_n)$, entonces se cumple una y solo una de las siguientes:

1. $\varphi = (t \equiv s)$, con $t, s \in T^\tau$, unicos y tales que las variables que ocurren en t o en s estan todas en $\{v_1, \dots, v_n\}$

2. $\varphi = r(t_1, \dots, t_m)$, con $r \in \mathcal{R}_m$ y $t_1, \dots, t_m \in T^\tau$, unicos y tales que las variables que ocurren en cada t_i están todas en $\{v_1, \dots, v_n\}$
3. $\varphi = (\varphi_1 \wedge \varphi_2)$, con $\varphi_1, \varphi_2 \in F^\tau$, unicas y tales que $Li(\varphi_1) \cup Li(\varphi_2) \subseteq \{v_1, \dots, v_n\}$
4. $\varphi = (\varphi_1 \vee \varphi_2)$, con $\varphi_1, \varphi_2 \in F^\tau$, unicas y tales que $Li(\varphi_1) \cup Li(\varphi_2) \subseteq \{v_1, \dots, v_n\}$
5. $\varphi = (\varphi_1 \rightarrow \varphi_2)$, con $\varphi_1, \varphi_2 \in F^\tau$, unicas y tales que $Li(\varphi_1) \cup Li(\varphi_2) \subseteq \{v_1, \dots, v_n\}$
6. $\varphi = (\varphi_1 \leftrightarrow \varphi_2)$, con $\varphi_1, \varphi_2 \in F^\tau$, unicas y tales que $Li(\varphi_1) \cup Li(\varphi_2) \subseteq \{v_1, \dots, v_n\}$
7. $\varphi = \neg\varphi_1$, con $\varphi_1 \in F^\tau$, unica y tal que $Li(\varphi_1) \subseteq \{v_1, \dots, v_n\}$
8. $\varphi = \forall v_j \varphi_1$, con $v_j \in \{v_1, \dots, v_n\}$, y $\varphi_1 \in F^\tau$, unica y tal que $Li(\varphi_1) \subseteq \{v_1, \dots, v_n\}$
9. $\varphi = \forall v_j \varphi_1$, con $v_j \in Var - \{v_1, \dots, v_n\}$, y $\varphi_1 \in F^\tau$, unica y tal que $Li(\varphi_1) \subseteq \{v_1, \dots, v_n, v\}$
10. $\varphi = \exists v_j \varphi_1$, con $v_j \in \{v_1, \dots, v_n\}$, y $\varphi_1 \in F^\tau$, unica y tal que $Li(\varphi_1) \subseteq \{v_1, \dots, v_n\}$
11. $\varphi = \exists v_j \varphi_1$, con $v_j \in Var - \{v_1, \dots, v_n\}$, y $\varphi_1 \in F^\tau$, unica y tal que $Li(\varphi_1) \subseteq \{v_1, \dots, v_n, v\}$

Proof. TODO □

Convencion 6. Cuando hayamos declarado $\varphi =_d \varphi(v_1, \dots, v_n)$ entonces:

- Si se da el caso (1) del lema anterior, supondremos tacitamente que también hemos hecho las declaraciones $t =_d t(v_1, \dots, v_n)$ y $s =_d s(v_1, \dots, v_n)$
- Si se da el caso (2) del lema anterior, supondremos tacitamente que también hemos hecho las declaraciones $t_1 =_d t_1(v_1, \dots, v_n), \dots, t_m =_d t_m(v_1, \dots, v_n)$
- Si se da alguno de los casos (3), (4), (5) o (6) del lema anterior, supondremos tacitamente que también hemos hecho las declaraciones $\varphi_1 =_d \varphi_1(v_1, \dots, v_n)$ y $\varphi_2(v_1, \dots, v_n)$
- Si se da alguno de los casos (7), (8) o (10) del lema anterior, supondremos tacitamente que también hemos hecho la declaración $\varphi_1 =_d \varphi_1(v_1, \dots, v_n)$
- Si se da alguno de los casos (9) u (11) del lema anterior, supondremos tacitamente que también hemos hecho la declaración $\varphi_1 =_d \varphi_1(v_1, \dots, v_n, v)$

Lema 43. Supongamos $\varphi =_d \varphi(v_1, \dots, v_n)$. Sea $\mathbf{A} = (A, i)$ un modelo de tipo τ y sean $a_1, \dots, a_n \in A$. Entonces:

1. Si $\varphi = (t \equiv s)$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff t^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n] = s^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n]$$

2. Si $\varphi = r(t_1, \dots, t_m)$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff (t_1^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n], \dots, t_m^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n]) \in r^{\mathbf{A}}$$

3. Si $\varphi = (\varphi_1 \wedge \varphi_2)$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff \mathbf{A} \models \varphi_1[a_1, \dots, a_n] \text{ y } \mathbf{A} \models \varphi_2[a_1, \dots, a_n]$$

4. Si $\varphi = (\varphi_1 \vee \varphi_2)$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff \mathbf{A} \models \varphi_1[a_1, \dots, a_n] \text{ o } \mathbf{A} \models \varphi_2[a_1, \dots, a_n]$$

5. Si $\varphi = (\varphi_1 \rightarrow \varphi_2)$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff \mathbf{A} \models \varphi_2[a_1, \dots, a_n] \text{ o } \mathbf{A} \not\models \varphi_1[a_1, \dots, a_n]$$

6. Si $\varphi = (\varphi_1 \leftrightarrow \varphi_2)$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff \text{ya sea se dan } \mathbf{A} \models \varphi_1[a_1, \dots, a_n] \text{ y } \mathbf{A} \models \varphi_2[a_1, \dots, a_n], \text{ o se dan } \mathbf{A} \not\models \varphi_1[a_1, \dots, a_n] \text{ y } \mathbf{A} \not\models \varphi_2[a_1, \dots, a_n]$$

7. Si $\varphi = \neg \varphi_1$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff \mathbf{A} \not\models \varphi_1[a_1, \dots, a_n]$$

8. Si $\varphi = \forall v_j \varphi_1$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff \mathbf{A} \models \varphi_1[a_1, \dots, a_{j-1}, a, a_{j+1}, \dots, a_n], \text{ para todo } a \in A$$

9. Si $\varphi = \forall v \varphi_1$, con $v \notin \{v_1, \dots, v_n\}$ y $\varphi_1 =_d \varphi_1(v_1, \dots, v_n, v)$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff \mathbf{A} \models \varphi_1[a_1, \dots, a_n, a], \text{ para todo } a \in A$$

10. Si $\varphi = \exists v_j \varphi_1$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff \mathbf{A} \models \varphi_1[a_1, \dots, a_{j-1}, a, a_{j+1}, \dots, a_n], \text{ para algun } a \in A$$

11. Si $\varphi = \exists v \varphi_1$, con $v \notin \{v_1, \dots, v_n\}$ y $\varphi_1 =_d \varphi_1(v_1, \dots, v_n, v)$, entonces

$$\mathbf{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \iff \mathbf{A} \models \varphi_1[a_1, \dots, a_n, a], \text{ para algun } a \in A$$

Proof. Se acepta sin demostracion

□

Dos teoremas de reemplazo

Teorema 8 (De reemplazo para terminos).

Supongamos $t =_d t(w_1, \dots, w_k), s_1 =_d s_1(v_1, \dots, v_n), \dots, s_k =_d s_k(v_1, \dots, v_n)$. Todas las variables de $t(s_1, \dots, s_k)$ estan en $\{v_1, \dots, v_n\}$ y si declaramos $t(s_1, \dots, s_k) =_d t(s_1, \dots, s_k)(v_1, \dots, v_n)$, entonces para cada estructura \mathbf{A} y $a_1, \dots, a_n \in A$ se tiene que:

$$t(s_1, \dots, s_k)^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n] = t^{\mathbf{A}}[s_1^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n], \dots, s_k^{\mathbf{A}}[a_1, \dots, a_n]]$$

Proof. Se acepta sin demostracion □

Definición 62. Sea $\varphi \in F^\tau$, $v, w \in Var$. Diremos que v es *sustituible por w en φ* cuando ninguna ocurrencia libre de v en φ sucede dentro de una ocurrencia de una subformula de la forma $Qw\psi$ en φ .

Lema 44. Sea $\varphi \in F^\tau$, $v, w \in Var$. Se cumplen las siguientes propiedades:

1. Si φ es atomica, entonces v es sustituible por w en φ
2. Si $\varphi = (\varphi_1 \eta \varphi_2)$, entonces v es sustituible por w en $\varphi \iff v$ es sustituible por w en φ_1 y φ_2
3. Si $\varphi = \neg \varphi_1$, entonces v es sustituible por w en $\varphi \iff v$ es sustituible por w en φ_1
4. Si $\varphi = Qv\varphi_1$, entonces v es sustituible por w en φ
5. Si $\varphi = Qw\varphi_1$ y $v \in Li(\varphi_1)$, entonces v no es sustituible por w en φ
6. Si $\varphi = Qw\varphi_1$ y $v \notin Li(\varphi_1)$, entonces v es sustituible por w en φ
7. Si $\varphi = Qu\varphi_1$, con $u \neq v, w$, entonces v es sustituible por w en $\varphi \iff v$ es sustituible por w en φ_1

Proof. TODO □

Teorema 9. Supongamos $\varphi =_d \varphi(w_1, \dots, w_k), t_1 =_d t_1(v_1, \dots, v_n), \dots, t_k =_d t_k(v_1, \dots, v_n)$ y supongamos ademas que cada w_j es sustituible por t_j en φ . Entonces:

1. $Li(\varphi(t_1, \dots, t_k)) \subseteq \{v_1, \dots, v_n\}$
2. Si declaramos $\varphi(t_1, \dots, t_k) =_d \varphi(t_1, \dots, t_k)(v_1, \dots, v_n)$, entonces para cada estructura \mathbf{A} y $\vec{a} \in A^n$ se tiene

$$\mathbf{A} \models \varphi(t_1, \dots, t_k)[\vec{a}] \iff \mathbf{A} \models \varphi[t_1^{\mathbf{A}}[\vec{a}], \dots, t_k^{\mathbf{A}}[\vec{a}]]$$

Proof. Se acepta sin demostracion □

Elementos definibles

Definición 63. Sea \mathbf{A} un modelo de tipo τ . Diremos que un elemento de a de A es *definible* en \mathbf{A} si hay una formula $\varphi =_d \varphi(v)$ tal que $\mathbf{A} \models \varphi[a]$ y para cada $b \in A - \{a\}$ se tiene que $\mathbf{A} \not\models \varphi[b]$. Es decir, a es el unico elemento de A que cumple $\mathbf{A} \models \varphi[a]$. En tal caso tambien diremos que φ *define* a en \mathbf{A} .

12 Teorias de primer orden

Definición 64. Una *teoria de primer orden* sera un par (Σ, τ) , donde τ es un tipo y Σ es un conjunto de sentencias de tipo τ . Los elementos de Σ seran llamados *axiomas propios* de (Σ, τ) . Un *modelo* de (Σ, τ) sera una estructura de tipo τ la cual satisfaga todos los axiomas propios de (Σ, τ) .

13 Definicion del concepto de prueba

13.1 Reglas

Definición 65. Definiremos una serie de conjuntos los cuales poseen informacion deductiva basica. Sea T_c^τ el conjunto de los terminos cerrados de tipo τ . Sean

$$Partic^\tau = \{(\forall v \varphi(v), \varphi(t)) : \varphi =_d \varphi(v) \in F^\tau \text{ y } t \in T_c^\tau\} \quad (1)$$

$$Exist^\tau = \{(\varphi(t), \exists v \varphi(v)) : \varphi =_d \varphi(v) \in F^\tau \text{ y } t \in T_c^\tau\} \quad (2)$$

$$Evoc^\tau = \{(\varphi, \varphi(v)) : \varphi \in S^\tau\} \quad (3)$$

$$Absur^\tau = \{((\neg \varphi \rightarrow (\psi \wedge \neg \psi)), \varphi) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \cup \{((\varphi \rightarrow (\psi \wedge \neg \psi)), \neg \varphi) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \quad (4)$$

$$ConjElim^\tau = \{((\varphi \wedge \psi), \varphi) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \cup \{((\varphi \wedge \psi), \psi) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \quad (5)$$

$$EquivElim^\tau = \{((\varphi \leftrightarrow \psi), (\varphi \rightarrow \psi)) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \cup \{((\varphi \leftrightarrow \psi), (\psi \rightarrow \varphi)) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \quad (6)$$

$$DisjInt^\tau = \{(\varphi, (\varphi \vee \psi)) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \cup \{(\psi, (\varphi \vee \psi)) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \quad (7)$$

Diremos que φ se deduce de ψ por la regla de *particularizacion* (resp. *existencia*, *evocacion*, *absurdo*, *conjuncion-eliminacion*, *equivalencia-eliminacion*, *disjuncion-introduccion*), con respecto a τ para expresar que $(\psi, \varphi) \in Partic^\tau$ (resp. $Exist^\tau, Evoc^\tau, Absur^\tau, ConjElim^\tau, EquivElim^\tau, DisjInt^\tau$).

Sea

$$Commut^\tau = Commut1^\tau \cup Commut2^\tau$$

donde

$$\begin{aligned} Commut1^\tau &= \{((t \equiv s), (s \equiv t)) : s, t \in T_c^\tau\} \\ Commut2^\tau &= \{((\varphi \leftrightarrow \psi), (\psi \leftrightarrow \varphi)) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \end{aligned}$$

Diremos que φ se deduce de ψ por regla de *commutatividad*, con respecto a τ para expresar que $(\psi, \varphi) \in Commut^\tau$

Sean

$$\begin{aligned} ModPon^\tau &= \{(\varphi, (\varphi \rightarrow \psi), \psi) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \\ ConjInt^\tau &= \{(\varphi, \psi, (\varphi \wedge \psi)) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \\ EquivInt^\tau &= \{((\varphi \rightarrow \psi), (\psi \rightarrow \varphi), (\varphi \leftrightarrow \psi)) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \\ DisjElim^\tau &= \{(\neg\varphi, (\varphi \vee \psi), \psi) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \cup \{(\neg\psi, (\varphi \vee \psi), \varphi) : \varphi, \psi \in S^\tau\} \end{aligned}$$

Diremos que φ se deduce de ψ_1 y ψ_2 por la regla de *Modus Ponens* (resp. *conjuncion-introduccion*, *equivalencia-introduccion*, *disjuncion-eliminacion*), con respecto a τ para expresar que $(\psi_1, \psi_2, \varphi) \in ModPon^\tau$ (resp. $ConjInt^\tau, EquivInt^\tau, DisjElim^\tau$).

Sea

$$DivPorCas^\tau = \{((\varphi_1 \vee \varphi_2), (\varphi_1 \rightarrow \psi), (\varphi_2 \rightarrow \psi), \psi) : \varphi_1, \varphi_2, \psi \in S^\tau\}$$

Diremos que φ se deduce de ψ_1, ψ_2, ψ_3 por la regla de *division por casos* con respecto a τ para expresar que $(\psi_1, \psi_2, \psi_3, \varphi) \in DivPorCas^\tau$.

Sea

$$Reemp^\tau = Reemp1^\tau \cup Reemp2^\tau$$

donde

$$\begin{aligned} Reemp1^\tau &= \{((t \equiv s), \gamma, \hat{\gamma}) : s, t \in T_c^\tau, \gamma \in S^\tau, \hat{\gamma} = \text{resultado de reemplazar en } \gamma \text{ una ocurrencia de } t \text{ por } s\} \\ Reemp2^\tau &= \{(\forall v_1 \dots v_n (\varphi \leftrightarrow \psi), \gamma, \hat{\gamma}) : \varphi, \psi \in F^\tau, Li(\varphi) = Li(\psi) = \{v_1, \dots, v_n, n \geq 0, \gamma \in S^\tau, \\ &\quad \hat{\gamma} = \text{resultado de reemplazar en } \gamma \text{ una ocurrencia de } \varphi \text{ por } \psi\}\} \end{aligned}$$

Diremos que φ se deduce de ψ_1, ψ_2 por la regla de *reemplazo*, con respecto a τ para expresar que $(\psi_1, \psi_2, \varphi) \in Reemp^\tau$.

Sea

$$Trans^\tau = Trans1^\tau \cup Trans2^\tau \cup Trans3^\tau$$

donde

$$Trans1^\tau = \{((t \equiv s), (s \equiv u), (t \equiv u)) : t, s, u \in T_c^\tau\}$$

$$Trans2^\tau = \{((\varphi \rightarrow \psi), (\psi \rightarrow \Phi), (\varphi \rightarrow \Phi)) : \varphi, \psi, \Phi \in S^\tau\}$$

$$Trans3^\tau = \{((\varphi \leftrightarrow \psi), (\psi \leftrightarrow \Phi), (\varphi \leftrightarrow \Phi)) : \varphi, \psi, \Phi \in S^\tau\}$$

Diremos que φ se deduce de ψ_1, ψ_2 por la regla de *transitividad*, con respecto a τ para expresar que $(\psi_1, \psi_2, \varphi) \in Trans^\tau$.

Sea

$$Generaliz^\tau = \{(\psi, \forall v \hat{\psi}) : \psi \in S^\tau, v \text{ no ocurre en } \psi \text{ y existe } c \in \mathcal{C} \text{ tal que } c \text{ ocurre en } \psi \text{ y}$$

$$\hat{\psi} = \text{resultado de reemplazar en } \psi \text{ cada ocurrencia de } c \text{ por } v\}$$

Lema 45. Si $(\varphi_1, \varphi_2) \in Generaliz^\tau$, entonces el nombre de constante c del cual habla la definicion de $Generaliz^\tau$ esta univocamente determinado por el par (φ_1, φ_2)

Proof. Notese que c es el unico nombre de constante que ocurre en φ_1 y no ocurre en φ_2 . □

Escribiremos $(\varphi_1, \varphi_2) \in Generaliz^\tau$ via c para expresar que $(\varphi_1, \varphi_2) \in Generaliz^\tau$ y que c es el unico nombre de constante que ocurre en φ_1 y no ocurre en φ_2 . Diremos que φ_2 se deduce de φ_1 por la regla de *generalizacion con nombre de constante c* , con respecto a τ , para expresar que $(\varphi_1, \varphi_2) \in Generaliz^\tau$ via c .

Sea

$$Elec^\tau = \{(\exists v \varphi(v), \varphi(e)) : \varphi =_d \varphi(v) \in F^\tau, Li(\varphi) = \{v\}, \text{ y } e \in \mathcal{C} \text{ no ocurre en } \varphi\}$$

Lema 46. Si $(\varphi_1, \varphi_2) \in Elec^\tau$, entonces el nombre de constante e del cual habla la definicion de $Elec^\tau$ esta univocamente determinado por el par (φ_1, φ_2)

Proof. Notese que e es el unico nombre de constante que ocurre en φ_2 pero no en φ_1 . Esto es porque en la definicion, $Li(\varphi) = \{v\}$, por lo tanto sabemos que e va a ocurrir en φ_2 . □

Escribiremos $(\varphi_1, \varphi_2) \in Elec^\tau$ via e para expresar que $(\varphi_1, \varphi_2) \in Elec^\tau$ y que e es el unico nombre de constante que ocurre en φ_2 y no ocurre en φ_1 . Diremos que φ_2 se deduce de φ_1 por la regla de *eleccion con nombre de constante e* , con respecto a τ , para expresar que $(\varphi_1, \varphi_2) \in Elec^\tau$ via e .

Lema 47. Sea τ un tipo. Todas las reglas excepto las reglas de eleccion y generalizacion son universales en el sentido que si φ se deduce de ψ_1, \dots, ψ_k por alguna de estas reglas, entonces $((\psi_1 \wedge \dots \wedge \psi_k) \rightarrow \varphi)$ es una sentencia valida.

13.2 Axiomas logicos

Definición 66. Llamaremos *axiomas logicos de tipo τ* a todas las sentencias de alguna de las siguientes formas:

- $(\varphi \leftrightarrow \varphi)$
- $(t \equiv t)$
- $(\varphi \vee \neg\varphi)$
- $(\varphi \leftrightarrow \neg\neg\varphi)$
- $(\neg\forall v\psi \leftrightarrow \exists v\neg\psi)$
- $(\neg\exists v\psi \leftrightarrow \forall v\neg\psi)$

donde $t \in T_c^\tau, \varphi \in S^\tau, \psi \in F^\tau, v \in Var$ y $Li(\psi) \subseteq \{v\}$. Con $AxLog^\tau$ denotaremos el conjunto

$$\{\varphi \in S^\tau : \varphi \text{ es un axioma logico de tipo } \tau\}$$

13.3 Justificaciones

Definición 67. Llamaremos *numerales* a lo siguientes simbolos:

$$0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \quad 9$$

Usaremos Num para denotar al conjunto de numerales. Notese que $Num \cap \omega = \emptyset$. Sea $S: Num^* \rightarrow Num^*$ definida de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 S(\varepsilon) &= 1 \\
 S(\alpha 0) &= \alpha 1 \\
 S(\alpha 1) &= \alpha 2 \\
 S(\alpha 2) &= \alpha 3 \\
 S(\alpha 3) &= \alpha 4 \\
 S(\alpha 4) &= \alpha 5 \\
 S(\alpha 5) &= \alpha 6 \\
 S(\alpha 6) &= \alpha 7 \\
 S(\alpha 7) &= \alpha 8 \\
 S(\alpha 8) &= \alpha 9 \\
 S(\alpha 9) &= S(\alpha)0
 \end{aligned}$$

Definamos $-: \omega \rightarrow Num^*$ de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \bar{0} &= \varepsilon \\
 \overline{n+1} &= S(\bar{n})
 \end{aligned}$$

Sea $Nombres_1$ el conjunto formado por las siguientes palabras:

EXISTENCIA
 COMMUTATIVIDAD
 PARTICULARIZACION
 ABSURDO
 EVOCACION
 CONJUNCIONELIMINACION
 EQUIVALENCIAELIMINACION
 DISJUNCIONINTRODUCCION
 ELECCION
 GENERALIZACION

Sea $Nombres_2$ el conjunto formado por las siguientes palabras:

MODUSPONENS
TRANSITIVIDAD
CONJUNCIONINTRODUCCION
EQUIVALENCIAINTRODUCCION
DISJUNCIONELIMINACION
REEMPLAZO

Una *justificacion basica* es una palabras perteneciente a la union de los siguientes conjuntos de palabras:

$\{\text{CONCLUSION, AXIOMAPROPIO, AXIOMALOGICO}\}$
 $\{\alpha(\bar{k}) : k \in \mathbf{N} \text{ y } \alpha \in Nombres_1\}$
 $\{\alpha(\bar{j}, \bar{k}) : j, k \in \mathbf{N} \text{ y } \alpha \in Nombres_2\}$
 $\{\text{DIVISIONPORCASOS}(\bar{j}, \bar{k}, \bar{l}) : j, k, l \in \mathbf{N}\}$

Usaremos $JustBas$ para denotar al conjunto formado por todas las justificaciones basicas. Una *justificacion* es una palabra que ya sea es una justificacion basica o pertenece a la union de los siguientes conjuntos de palabras:

$\{\text{HIPOTESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$
 $\{\text{TESIS}\bar{j}\alpha : j \in \mathbf{N} \text{ y } \alpha \in JustBas\}$

Usaremos $Just$ para denotar el conjunto formado por todas las justificaciones.

Cabe destacar que los elementos de $Just$ son palabras del alfabeto formado por los siguientes simbolos:

() , 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 A B C D E G H I J L M N O P Q R S T U V X Z

13.4 Concatenaciones balanceadas de justificaciones

Lema 48. Sea $\mathbf{J} \in Just^+$. Hay unicos $n \geq 1$ y $J_1, \dots, J_n \in Just$ tales que $\mathbf{J} = J_1 \dots J_n$

Proof. Se acepta sin demostracion

□

Definición 68. Dada $\mathbf{J} \in Just^+$, usaremos $n(\mathbf{J})$ y $\mathbf{J}_1, \dots, \mathbf{J}_{n(\mathbf{J})}$ para denotar los unicos n y J_1, \dots, J_n cuya existencia garantiza el lema anterior.

Definición 69. Dados numeros naturales $i \leq j$, usaremos $\langle i, j \rangle$ para denotar al conjunto $\{i, i+1, \dots, j\}$. A los conjuntos de la forma $\langle i, j \rangle$ los llamaremos *bloques*.

Definición 70. Dada $\mathbf{J} \in Just^+$ definamos:

$$\mathcal{B}^{\mathbf{J}} = \{\langle i, j \rangle \mid \exists k : \mathbf{J}_i = \text{HIPOTESIS}\bar{k} \text{ y } \mathbf{J}_j = \text{TESIS}\bar{k}\alpha \text{ para algun } \alpha \in JustBas\}$$

Definición 71. Diremos que $\mathbf{J} \in Just^+$ es *balanceada* si se dan las siguientes:

1. Por cada $k \in \mathbf{N}$ a lo sumo hay un i tal que $\mathbf{J}_i = \text{HIPOTESIS}\bar{k}$ y a lo sumo hay un i tal que $\mathbf{J}_i = \text{TESIS}\bar{k}\alpha$, con $\alpha \in JustBas$.
2. Si $\mathbf{J}_i = \text{HIPOTESIS}\bar{k}$, entonces hay un $l > i$ tal que $\mathbf{J}_l = \text{TESIS}\bar{k}\alpha$, con $\alpha \in JustBas$.
3. Si $\mathbf{J}_i = \text{TESIS}\bar{k}\alpha$, con $\alpha \in JustBas$, entonces hay un $l < i$ tal que $\mathbf{J}_l = \text{HIPOTESIS}\bar{k}$.
4. Si $B_1, B_2 \in \mathcal{B}^{\mathbf{J}}$, entonces $B_1 \cap B_2 = \emptyset$ o $B_1 \subseteq B_2$ o $B_2 \subseteq B_1$

13.5 Pares adecuados

Lema 49. Sea $\varphi \in S^{\tau+}$. Hay unicos $n \geq 1$ y $\varphi_1, \dots, \varphi_n \in S^{\tau}$ tales que $\varphi = \varphi_1 \dots \varphi_n$.

Proof. TODO □

Definición 72. Dada $\varphi \in S^{\tau+}$, usaremos $n(\varphi)$ y $\varphi_1, \dots, \varphi_{n(\varphi)}$ para denotar los unicos n y $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ cuya existencia garantiza el lema anterior.

Definición 73. Un *par adecuado de tipo τ* es un par $(\varphi, \mathbf{J}) \in S^{\tau+} \times Just^+$ tal que $n(\varphi) = n(\mathbf{J})$ y \mathbf{J} es balanceada.

Si $\langle i, j \rangle \in \mathcal{B}^{\mathbf{J}}$, entonces φ_i sera la *hipotesis* del bloque $\langle i, j \rangle$ en (φ, \mathbf{J}) y φ_j sera la *tesis* del bloque $\langle i, j \rangle$ en (φ, \mathbf{J}) .

Diremos que φ_i esta *bajo la hipotesis* φ_l en (φ, \mathbf{J}) o que φ_l es una *hipotesis de* φ_i en (φ, \mathbf{J}) cuando haya en $\mathcal{B}^{\mathbf{J}}$ un bloque de la forma $\langle l, j \rangle$ el cual contenga a i .

Sean $i, j \in \langle 1, n(\varphi) \rangle$. Diremos que i es *anterior* a j en (φ, \mathbf{J}) si $i < j$ y ademas para todo $B \in \mathcal{B}^{\mathbf{J}}$ se tiene que $i \in B \Rightarrow j \in B$.

13.6 Dependencia de constantes en pares adecuados

Definición 74. Dadas $e, d \in \mathcal{C}$, diremos que e *depende directamente de* d en (φ, \mathbf{J}) si hay numeros $1 \leq l \leq j \leq n(\varphi)$ tales que:

1. l es anterior a j en (φ, \mathbf{J})
2. $\mathbf{J}_j = \alpha \text{ELECCION}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$ y $(\varphi_l, \varphi_j) \in \text{Elec}^\tau$ via e
3. d ocurre en φ_l

Dados $e, d \in \mathcal{C}$ diremos que e *depende de* d en (φ, \mathbf{J}) si existen $e_0, \dots, e_{k+1} \in \mathcal{C}$, con $k \geq 0$ tales que:

1. $e_0 = e$ y $e_{k+1} = d$
2. e_i depende directamente de e_{i+1} en (φ, \mathbf{J}) , para $i = 0, \dots, k$

13.7 Definicion de prueba

Definición 75. Sea (Σ, τ) una teoria de primer orden. Sea φ una sentencia de tipo τ . Una *prueba de* φ en (Σ, τ) sera un par adecuado (φ, \mathbf{J}) de algun tipo $\tau_1 = (\mathcal{C} \cup \mathcal{C}_1, \mathcal{F}, \mathcal{R}, a)$ con \mathcal{C}_1 finito y disjunto con \mathcal{C} tal que:

1. Cada φ_i es una sentencia de tipo τ_1
2. $\varphi_{n(\varphi)} = \varphi$
3. Si $\langle i, j \rangle \in \mathcal{B}^{\mathbf{J}}$, entonces $\varphi_{j+1} = (\varphi_i \rightarrow \varphi_j)$ y $\mathbf{J}_{j+1} = \alpha \text{CONCLUSION}$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$
4. Para cada $i = 1, \dots, n(\varphi)$ se da una de las siguientes:
 - (a) $\mathbf{J}_i = \text{HIPOTESIS}\bar{k}$ para algun $k \in \mathbf{N}$
 - (b) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{CONCLUSION}$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$ y hay un j tal que $\langle j, i-1 \rangle \in \mathcal{B}^{\mathbf{J}}$ y $\varphi_i = (\varphi_j \rightarrow \varphi_{i-1})$
 - (c) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{AXIOMALOGICO}$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$ y φ_i es un axioma logico de tipo τ_1
 - (d) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{AXIOMAPROPIO}$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$ y $\varphi_i \in \Sigma$
 - (e) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{PARTICULARIZACION}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$, l anterior a i y $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{Partic}^{\tau_1}$
 - (f) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{COMMUTATIVIDAD}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$, l anterior a i y $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{Commut}^{\tau_1}$

- (g) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{ABSURDO}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l anterior a i y $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{Absur}^{\tau_1}$
- (h) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{EVOCACION}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l anterior a i y $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{Evoc}^{\tau_1}$
- (i) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{EXISTENCIA}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l anterior a i y $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{Exist}^{\tau_1}$
- (j) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{CONJUNCIONELIMINACION}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l anterior a i y $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{ConjElim}^{\tau_1}$
- (k) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{DISJUNCIONINTRODUCCION}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l anterior a i y $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{DisjElim}^{\tau_1}$
- (l) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{EQUIVALENCIAELIMINACION}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l anterior a i y $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{EquivElim}^{\tau_1}$
- (m) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{MODUSPONENS}(\bar{l}_1, \bar{l}_2)$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l_1 y l_2 anteriores a i y $(\varphi_{l_1}, \varphi_{l_2}, \varphi_i) \in \text{ModPon}^{\tau_1}$
- (n) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{CONJUNCIONINTRODUCCION}(\bar{l}_1, \bar{l}_2)$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l_1 y l_2 anteriores a i y $(\varphi_{l_1}, \varphi_{l_2}, \varphi_i) \in \text{ConjInt}^{\tau_1}$
- (o) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{EQUIVALENCIAINTRODUCCION}(\bar{l}_1, \bar{l}_2)$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l_1 y l_2 anteriores a i y $(\varphi_{l_1}, \varphi_{l_2}, \varphi_i) \in \text{EquivInt}^{\tau_1}$
- (p) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{DISJUNCIONINTRODUCCION}(\bar{l}_1, \bar{l}_2)$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l_1 y l_2 anteriores a i y $(\varphi_{l_1}, \varphi_{l_2}, \varphi_i) \in \text{DisjElim}^{\tau_1}$
- (q) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{REEMPLAZO}(\bar{l}_1, \bar{l}_2)$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l_1 y l_2 anteriores a i y $(\varphi_{l_1}, \varphi_{l_2}, \varphi_i) \in \text{Reemp}^{\tau_1}$
- (r) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{TRANSITIVIDAD}(\bar{l}_1, \bar{l}_2)$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l_1 y l_2 anteriores a i y $(\varphi_{l_1}, \varphi_{l_2}, \varphi_i) \in \text{Trans}^{\tau_1}$
- (s) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{DIVISIONPORCASOS}(\bar{l}_1, \bar{l}_2, \bar{l}_3)$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$,
 l_1, l_2 y l_3 anteriores a i y $(\varphi_{l_1}, \varphi_{l_2}, \varphi_{l_3}, \varphi_i) \in \text{DivPorCas}^{\tau_1}$
- (t) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{ELECCION}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$, l anterior a i y $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{Elec}^{\tau_1}$
 via un nombre de constante e , el cual no pertenece a \mathcal{C} y no ocurre en $\varphi_1, \dots, \varphi_{i-1}$
- (u) $\mathbf{J}_i = \alpha \text{GENERALIZACION}(\bar{l})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$, l anterior a i y
 $(\varphi_l, \varphi_i) \in \text{Generaliz}^{\tau_1}$
 via un nombre de constante e , el cual cumple:

- i. $c \notin \mathcal{C}$
- ii. Para cada $u \in \langle 1, n(\boldsymbol{\varphi}) \rangle$, si $\mathbf{J}_u = \alpha \text{ELECCION}(\bar{v})$, con $\alpha \in \{\varepsilon\} \cup \{\text{TESIS}\bar{k} : k \in \mathbf{N}\}$, entonces no se da que $(\boldsymbol{\varphi}_v, \boldsymbol{\varphi}_u) \in \text{Elec}^{\tau_1}$ via c .
- iii. c no ocurre en ninguna hipótesis de $\boldsymbol{\varphi}_l$
- iv. Ningun nombre de constante que ocurra en $\boldsymbol{\varphi}_l$ o en sus hipótesis, depende de c .

14 El concepto de teorema

Definición 76. Cuando haya una prueba de φ en (Σ, τ) , diremos que φ es un *teorema* de la teoría (Σ, τ) , y escribiremos $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi$.

15 Propiedades basicas de pruebas y teoremas

Lema 50 (Cambio de indice de hipótesis). Sea $(\boldsymbol{\varphi}, \mathbf{J})$ una prueba formal de φ en (Σ, τ) . Sea $m \in \mathbf{N}$ tal que $\mathbf{J}_i \neq \text{HIPOTESIS}\bar{m}$, para cada $i = 1 = \dots, n(\boldsymbol{\varphi})$. Supongamos que $\mathbf{J}_i = \text{HIPOTESIS}\bar{k}$ y que $\mathbf{J}_j = \text{TESIS}\bar{k}\alpha$, con $[\alpha]_1 \notin \text{Num}$. Sea $\tilde{\mathbf{J}}$ el resultados de reemplazar en \mathbf{J} la justificación \mathbf{J}_i por $\text{HIPOTESIS}\bar{m}$ y reemplazar la justificación \mathbf{J}_j por $\text{TESIS}\bar{m}\alpha$. Entonces $(\boldsymbol{\varphi}, \tilde{\mathbf{J}})$ es una prueba formal de φ en (Σ, τ) .

Proof. Se acepta sin demostracion □

Lema 51 (Cambio de constantes auxiliares). Sea $(\boldsymbol{\varphi}, \mathbf{J})$ una prueba formal de φ en (Σ, τ) . Sea \mathcal{C}_1 el conjunto de nombres de constante que ocurren en $\boldsymbol{\varphi}$ y que no pertenecen a \mathcal{C} . Sea $e \in \mathcal{C}_1$. Sea $\tilde{e} \notin \mathcal{C} \cup \mathcal{C}_1$ tal que $(\mathcal{C} \cup (\mathcal{C}_1 - \{e\}) \cup \{\tilde{e}\}, \mathcal{F}, \mathcal{R}, a)$ es un tipo. Sea $\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_i =$ resultado de reemplazar en $\boldsymbol{\varphi}_i$ cada ocurrencia de e por \tilde{e} . Entonces $(\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_1, \dots, \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{n(\boldsymbol{\varphi})}, \mathbf{J})$ es una prueba forma de φ en (Σ, τ) .

Proof. Se acepta sin demostracion □

Lema 52. Sea (Σ, τ) una teoría.

1. Si $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi_1, \dots, \varphi_n$ y $(\Sigma \cup \{\varphi_1, \dots, \varphi_n\}, \tau) \vdash \varphi$, entonces $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi$
2. Si $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi_1, \dots, \varphi_n$ y φ se deduce por alguna regla universal a partir de $\varphi_1, \dots, \varphi_n$, entonces $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi$
3. $(\Sigma, \tau) \vdash (\varphi \rightarrow \psi)$ si y solo si $(\Sigma \cup \{\varphi\}, \tau) \vdash \psi$

Proof. TODO □

15.1 Consistencia

Definición 77. Una teoria (Σ, τ) sera *inconsistente* cuando haya una sentencia φ tal que $(\Sigma, \tau) \vdash (\varphi \wedge \neg\varphi)$. Una teoria (Σ, τ) sera *consistente* cuando no sea inconsistente.

Lema 53. Sea (Σ, τ) una teoria.

1. Si (Σ, τ) es inconsistente, entonces $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi$, para toda sentencia φ
2. Si (Σ, τ) es consistente y $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi$, entonces $(\Sigma \cup \{\varphi\}, \tau)$ es consistente
3. Si $(\Sigma, \tau) \not\vdash \neg\varphi$, entonces $(\Sigma \cup \{\varphi\}, \tau)$ es consistente

Proof. TODO □

Definición 78. Dada (Σ, τ) una teoria, escribiremos $(\Sigma, \tau) \models \varphi$ cuando φ sea verdadera en todo modelo de (Σ, τ) .

Teorema 10 (Teorema de Correccion). $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi \implies (\Sigma, \tau) \models \varphi$

Proof. Se acepta sin demostracion □

Corolario 2. Si (Σ, τ) tiene un modelo, entonces (Σ, τ) es consistente.

Proof. Supongamos \mathbf{A} es un modelo de (Σ, τ) . Si (Σ, τ) fuera inconsistente, tendríamos que hay una $\varphi \in S^\tau$ tal que $(\Sigma, \tau) \vdash (\varphi \wedge \neg\varphi)$, lo cual por el teorema de Correccion nos diria que $\mathbf{A} \models (\varphi \wedge \neg\varphi)$ □

16 El algebra de Lindenbaum

Definición 79. Sea $T = (\Sigma, \tau)$ una teoria. Definimos la siguiente relacion sobre S^τ .

$$\varphi \dashv\vdash_T \psi \iff T \vdash (\varphi \leftrightarrow \psi)$$

Lema 54. $\dashv\vdash_T$ es una relacion de equivalencia

Proof. TODO □

Definición 80. Sea τ un tipo y $\varphi \in S^\tau$. Se dice que φ es *refutable* en (Σ, τ) si $(\Sigma, \tau) \vdash \neg\varphi$

Lema 55. Dada una teoria $T = (\Sigma, \tau)$, se tiene que:

1. $\{\varphi \in S^\tau : \varphi \text{ es un teorema de } T\} \in S^\tau / \dashv\vdash_T$

2. $\{\varphi \in S^\tau : \varphi \text{ es refutable en } T\} \in S^\tau / \dashv\vdash_T$

Proof. TODO □

Definición 81. Dada una teoria $T = (\Sigma, \tau)$ y $\varphi \in S^\tau$, $[\varphi]_T$ denotara la clase de φ con respecto a la relacion de equivalencia $\dashv\vdash_T$. Definiremos sobre $S^\tau / \dashv\vdash_T$ la siguiente operacion binaria s^T :

$$[\varphi]_T s^T [\psi]_T = [(\varphi \vee \psi)]_T$$

En forma analoga, definimos una operacion binaria i^T sobre $S^\tau / \dashv\vdash_T$:

$$[\varphi]_T i^T [\psi]_T = [(\varphi \wedge \psi)]_T$$

Ademas definimos una operacion unaria c^T sobre $S^\tau / \dashv\vdash_T$:

$$([\varphi]_T)^{c^T} = [\neg\varphi]_T$$

Denotaremos ademas con 1^T al conjunto $\{\varphi \in S^\tau : \varphi \text{ es un teorema de } T\}$ y con 0^T al conjunto $\{\varphi \in S^\tau : \varphi \text{ es refutable en } T\}$.

Observacion 12 (s^T bien definida). Si $[\varphi]_T = [\varphi']_T$ y $[\psi]_T = [\psi']_T$, entonces $[(\varphi \vee \psi)]_T = [(\varphi' \vee \psi')]_T$

Proof. TODO □

Teorema 11. Sea $T = (\Sigma, \tau)$ una teoria. Entonces $(S^\tau / \dashv\vdash_T, s^T, i^T, c^T, 0^T, 1^T)$ es un algebra de Boole.

Proof. TODO □

Definición 82. Dada una teoria $T = (\Sigma, \tau)$, denotaremos con \mathcal{A}_T al algebra de Boole $(S^\tau / \dashv\vdash_T, s^T, i^T, c^T, 0^T, 1^T)$. El algebra \mathcal{A}_T sera llamada el *algebra de Lindenbaum de la teoria T*.

Lema 56. Sea T una teoria y sea \leq^T el orden parcial asociado al algebra de Boole \mathcal{A}_T (es decir $[\varphi]_T \leq^T [\psi]_T \iff [\varphi]_T s^T [\psi]_T = [\psi]_T$), entonces se tiene que:

$$[\varphi]_T \leq^T [\psi]_T \iff T \vdash (\varphi \rightarrow \psi)$$

Proof. TODO □

17 Teorema de la completitud

Lema 57. Sean $\tau = (\mathcal{C}, \mathcal{F}, \mathcal{R}, a)$ y $\tau' = (\mathcal{C}', \mathcal{F}', \mathcal{R}', a')$ tipos. Se cumplen:

1. Si $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{C}', \mathcal{F} \subseteq \mathcal{F}', \mathcal{R} \subseteq \mathcal{R}'$ y $a'|_{\mathcal{F} \cup \mathcal{R}} = a$, entonces $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi$ implica $(\Sigma, \tau') \vdash \varphi$
2. Si $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{C}', \mathcal{F} \subseteq \mathcal{F}', \mathcal{R} \subseteq \mathcal{R}'$ y $a' = a$, entonces $(\Sigma, \tau') \vdash \varphi$ implica $(\Sigma, \tau) \vdash \varphi$, cada vez que $\Sigma \cup \{\varphi\} \subseteq S^\tau$

Proof. Se acepta sin demostracion □

Lema 58 (Lema del infimo). Sea $T = (\Sigma, \tau)$ una teoria y supongamos que τ tiene una cantidad infinita de nombres de constante que no ocurren en las sentencias de Sigma. Entonces para cada formula $\varphi =_d \varphi(v)$, se tiene que en el algebra de Lindembaum \mathcal{A}_T :

$$[\forall v \varphi(v)]_T = \inf(\{[\varphi]_T : t \in T_c^\tau\})$$

Proof. TODO □

Lema 59 (Lema de Coincidencia). Sea $\tau = (\mathcal{C}, \mathcal{F}, \mathcal{R}, a)$ y $\tau' = (\mathcal{C}', \mathcal{F}', \mathcal{R}', a')$ dos tipos cualesquiera y sea $\tau_\cap = (\mathcal{C}_\cap, \mathcal{F}_\cap, \mathcal{R}_\cap, a_\cap)$ donde:

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_\cap &= \mathcal{C} \cap \mathcal{C}' \\ \mathcal{F}_\cap &= \{f \in \mathcal{F} \cap \mathcal{F}' : a(f) = a'(f)\} \\ \mathcal{R}_\cap &= \{r \in \mathcal{R} \cap \mathcal{R}' : a(r) = a'(r)\} \\ a_\cap &= a|_{\mathcal{F}_\cap \cup \mathcal{R}_\cap} \end{aligned}$$

Entonces τ_\cap es un tipo tal que $T^{\tau_\cap} = T^\tau \cap T^{\tau'}$ y $F^{\tau_\cap} = F^\tau \cap F^{\tau'}$. Sean \mathbf{A} y \mathbf{A}' modelos de tipo τ y τ' respectivamente. Supongamos $A = A'$ y que $c^\mathbf{A} = c^{\mathbf{A}'}$, para cada $c \in \mathcal{C}_\cap$, $f^\mathbf{A} = f^{\mathbf{A}'}$, para cada $f \in \mathcal{F}_\cap$ y $r^\mathbf{A} = r^{\mathbf{A}'}$, para cada $r \in \mathcal{R}_\cap$. Entonces se cumplen:

1. Para cada $t =_d t(\vec{v}) \in T^{\tau_\cap}$ se tiene que $t^\mathbf{A}[\vec{a}] = t^{\mathbf{A}'}[\vec{a}]$, para cada $\vec{a} \in A^n$
2. Para cada $\varphi =_d \varphi(\vec{v}) \in F^{\tau_\cap}$ se tiene que $\mathbf{A} \models \varphi[\vec{a}] \iff \mathbf{A}' \models \varphi[\vec{a}]$
3. Si $\Sigma \cup \{\varphi\} \subseteq S^{\tau_\cap}$, entonces $(\Sigma, \tau) \models \varphi \iff (\Sigma, \tau') \models \varphi$

Proof. Se acepta sin demostracion □

Lema 60. Sea τ un tipo. Hay una infinitupla $(\gamma_1, \gamma_2, \dots) \in F^{\tau\mathbf{N}}$ tal que:

1. $|Li(\gamma_j)| \leq 1$, para cada $j = 1, 2, \dots$
2. Si $|Li(\gamma)| \leq 1$, entonces $\gamma = \gamma_j$ para algun $j \in \mathbb{N}$

Proof. TODO □

Teorema 12 (Teorema de Completitud). Sea $T = (\Sigma, \tau)$ una teoria de primer orden. Si $T \models \varphi$, entonces $T \vdash \varphi$

Proof. TODO □

Corolario 3. Toda teoria consistente tiene un modelo

Proof. TODO □

Corolario 4 (Teorema de Compacidad). Sea (Σ, τ) una teoria.

1. Si (Σ, τ) es tal que (Σ_0, τ) tiene un modelo, para cada subconjunto finito $\Sigma_0 \subseteq \Sigma$, entonces (Σ, τ) tiene un modelo
2. Si $(\Sigma, \tau) \models \varphi$, entonces hay un subconjunto finito $\Sigma_0 \subseteq \Sigma$ tal que $(\Sigma_0, \tau) \models \varphi$

18 Interpretacion semantica del algebra de Lindembaum

Definición 83. Sea $T = (\Sigma, \tau)$ una teoria. Dada $\varphi \in S^\tau$ definamos

$$\text{Mod}_T(\varphi) = \{\mathbf{A} : \mathbf{A} \text{ es modelo de } T \text{ y } \mathbf{A} \models \varphi\}$$

Lema 61. Dadas $\varphi, \psi \in S^\tau$, se tiene:

1. $[\varphi]_T \leq^T [\psi]_T \iff \text{Mod}_T(\varphi) \subseteq \text{Mod}_T(\psi)$
2. $[\varphi]_T = [\psi]_T \iff \text{Mod}_T(\varphi) = \text{Mod}_T(\psi)$
3. $[\varphi]_T <^T [\psi]_T \iff \text{Mod}_T(\varphi) \subsetneq \text{Mod}_T(\psi)$

19 La aritmetica de Peano

Definición 84. Sea $\tau_A = (\{0, 1\}, \{+^2, \cdot^2\}, \{\leq\}, a)$. Denotaremos con ω a la estructura de tipo τ_A que tiene a ω como universo e interpreta los nombres τ_A en la manera usual, es decir:

$$\begin{aligned} 0^\omega &= 0 \\ 1^\omega &= 1 \\ \leq^\omega &= \{(n, m) \in \omega^2 : n \leq m\} \\ +^\omega(n, m) &= n + m, \text{ para cada } n, m \in \omega \\ \cdot^\omega(n, m) &= n \cdot m, \text{ para cada } n, m \in \omega \end{aligned}$$

Sea Σ el conjunto formado por las siguientes sentencias:

1. $\forall x_1 \forall x_2 \forall x_3 \ x_1 + (x_2 + x_3) \equiv (x_1 + x_2) + x_3$
2. $\forall x_1 \forall x_2 \ x_1 + x_2 \equiv x_2 + x_1$
3. $\forall x_1 \forall x_2 \forall x_3 \ x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3) \equiv (x_1 \cdot x_2) \cdot x_3$
4. $\forall x_1 \forall x_2 \ x_1 \cdot x_2 \equiv x_2 \cdot x_1$
5. $\forall x_1 \ x_1 + 0 \equiv x_1$
6. $\forall x_1 \ x_1 \cdot 0 \equiv 0$
7. $\forall x_1 \ x_1 \cdot 1 \equiv x_1$
8. $\forall x_1 \forall x_2 \forall x_3 \ x_1 \cdot (x_2 + x_3) \equiv (x_1 \cdot x_2) + (x_1 \cdot x_3)$
9. $\forall x_1 \forall x_2 \forall x_3 \ (x_1 + x_3 \equiv x_2 + x_3 \rightarrow x_1 \equiv x_2)$
10. $\forall x_1 \ x_1 \leq x_1$
11. $\forall x_1 \forall x_2 \forall x_3 \ ((x_1 \leq x_2 \wedge x_2 \leq x_3) \rightarrow x_1 \leq x_3)$
12. $\forall x_1 \forall x_2 \ ((x_1 \leq x_2 \wedge x_2 \leq x_1) \rightarrow x_1 \equiv x_2)$
13. $\forall x_1 \forall x_2 \ (x_1 \leq x_2 \vee x_2 \leq x_1)$
14. $\forall x_1 \forall x_2 \ (x_1 \leq x_2 \rightarrow \exists x_3 \ x_2 \equiv x_1 + x_3)$
15. $0 < 1$

Es facil ver que estas sentencias son satisfechas por ω , por lo cual ω es un modelo de la teoria (Σ, τ_A) . Definamos

$$Verd_{\omega} = \{\varphi : S^{\tau_A} : \omega \models \varphi\}$$

Observacion 13. Sea $\mathbf{Q}^{\geq 0}$ la estructura de tipo τ_A que tiene a $r \in \mathbf{Q} : r \geq 0$ como universo e interpreta los nombres de τ_A de la manera usual. Notese que $\mathbf{Q}^{\geq 0}$ tambien es un modelo de la teoria (Σ, τ_A) definida justo antes. Pero entonces los teoremas de (Σ, τ_A) deben ser verdaderos en $\mathbf{Q}^{\geq 0}$, pero la sentencia $\forall x(x \leq 1 \rightarrow (x \equiv 0 \wedge x \equiv 1))$ es falsa en $\mathbf{Q}^{\geq 0}$, por lo cual no es un teorema de (Σ, τ_A) , sin embargo pertenece a $Verd_{\omega}$.

Es decir, los axiomas que habiamos definido antes son demasiado generales y deberiamos agregar axiomas mas caracteristicos de la estructura particular de ω .

Definición 85. Dada una formula $\psi \in F^{\tau_A}$ y variables v_1, \dots, v_{n+1} , con $n \geq 0$, tales que $Li(\psi) \subseteq \{v_1, \dots, v_{n+1}\}$ y $v_i \neq v_j$ siempre que $i \neq j$, denotaremos con $Ind_{\psi, v_1, \dots, v_{n+1}}$ a la siguiente sentencia de tipo τ_A

$$\forall v_1, \dots, \forall v_n ((\psi(\vec{v}, 0) \wedge \forall v_{n+1} (\psi(\vec{v}, v_{n+1}) \rightarrow \psi(\vec{v}, +(v_{n+1}, 1)))) \rightarrow \forall v_{n+1} \psi(\vec{v}, v_{n+1}))$$

donde suponemos que hemos declarado $\psi =_d \psi(v_1, \dots, v_{n+1})$.

Sea Σ_A el conjunto que resulta de agregarla al Σ definido anteriormente todas las sentencias de la forma $Ind_{\psi, v_1, \dots, v_{n+1}}$. La teoria (Σ_A, τ_A) sera llamada *Aritmetica DE Peano* y la denotaremos con *Arit*.

Lema 62. ω es un modelo de *Arit*

Observacion 14. $Ind_{\psi, v_1, \dots, v_{n+1}}$ es verdadera en ω

Observacion 15. $\mathbf{Q}^{\geq 0}$ no es un modelo de *Arit*

Definición 86. Definimos la funcion $\widehat{\cdot} : \omega \rightarrow \{(), + 0 1\}^*$ de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \widehat{0} &= 0 \\ \widehat{1} &= 1 \\ \widehat{n+1} &= +(\widehat{n}, 1), \text{ para cada } n \geq 1 \end{aligned}$$

Proposicion 2. Hay un modelo de *Arit* el cual no es isomorfo a ω

Lema 63. Las siguientes sentencias son teoremas de la aritmetica de Peano:

$$1. \forall x \ 0 \leq x$$

$$2. \forall x \ (x \leq 0 \rightarrow x \equiv 0)$$

$$3. \forall x \forall y \ (x + y \equiv 0 \rightarrow x \equiv 0 \wedge y \equiv 0)$$

$$4. \forall x \ (\neg(x \equiv 0) \rightarrow \exists z(x \equiv z + 1))$$

$$5. \forall x \forall y \ (x < y \rightarrow x + 1 \leq y)$$

$$6. \forall x \forall y \ (x < y + 1 \rightarrow x \leq y)$$

$$7. \forall x \forall y \ (x \leq y + 1 \rightarrow (x \leq y \vee x \equiv y + 1))$$