

DAO (Demostración Asistida por Ordenador) con Lean

José A. Alonso Jiménez

Grupo de Lógica Computacional
Dpto. de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial
Universidad de Sevilla
Sevilla, 22 de agosto de 2020

Esta obra está bajo una licencia Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Spain de Creative Commons.

Se permite:

- copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:

Reconocimiento. Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor.



No comercial. No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Compartir bajo la misma licencia. Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

- Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.
- Algunas de estas condiciones pueden no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.

Esto es un resumen del texto legal (la licencia completa). Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/es/> o envíe una carta a Creative Commons, 559 Nathan Abbott Way, Stanford, California 94305, USA.

Índice general

1	Introducción	5
2	Igualdad	7
2.1	Prueba mediante reescritura	7
2.2	Prueba con lemas y mediante encadenamiento de ecuaciones	11
2.3	Teorema aritmético con hipótesis y uso de lemas	13
2.4	Ejercicios sobre aritmética real	16
3	Conectivas: implicación, equivalencia, conjunción y disyunción)	23
3.1	Reglas de la implicación	23
3.1.1	Eliminación de la implicación	23
3.1.2	Introducción de la implicación	26
3.2	Reglas de la equivalencia	28
3.2.1	Eliminación de la equivalencia	28
3.3	Reglas de la conjunción	33
3.3.1	Eliminación de la conjunción	33
3.3.2	Introducción de la conjunción	36
3.4	Reglas de la disyunción	39
3.4.1	Eliminación de la disyunción	39
3.5	Ejercicios	41
3.5.1	Monotonía de la suma por la izquierda	41
3.5.2	Monotonía de la suma por la derecha	45
3.5.3	La suma de no negativos es expansiva	48
3.5.4	Suma de no negativos	51
3.5.5	Suma de desigualdades	52
4	Apéndices	55
4.1	Resumen de tácticas usadas	55
4.1.1	Demostraciones estructuradas	57
4.1.2	Composiciones y descomposiciones	57
4.2	Resumen de teoremas usados	57

4.3 Estilos de demostración	58
---------------------------------------	----

Capítulo 1

Introducción

El objetivo de este trabajo es presentar una introducción a la DAO (Demostración Asistida con Ordenador) usando [Lean](#) para usarla en las clases de la asignatura de [Razonamiento automático](#) del [Máster Universitario en Lógica, Computación e Inteligencia Artificial](#) de la Universidad de Sevilla. Por tanto, el único prerequisite es, como en el Máster, cierta madurez matemática como la que deben tener los alumnos de los Grados de Matemática y de Informática.

La exposición se hará mediante una colección de ejercicios. En cada ejercicio se mostrarán distintas pruebas del mismo resultado y se comentan las tácticas conforme se van usando y los lemas utilizados en las demostraciones.

Además, en cada ejercicio hay un enlace al código y a su lado otro que al pulsarlo abre el ejercicio en Lean Web (en una sesión del navegador) de forma que se puede navegar por las pruebas y editar otras alternativas.

El trabajo se presenta en 2 formas:

- Como un [libro en PDF](#)
- Como un [proyecto en GitHub](#).

Además, los vídeos correspondientes a cada uno de los ejercicios se encuentran en [YouTube](#).

El trabajo se basa fundamentalmente en el proyecto [lean-tutorials](#) de la [Comunidad Lean](#) que, a su vez, se basa en el curso [Introduction aux mathématiques formalisées](#) de [Patrick Massot](#).

Capítulo 2

Igualdad

En este capítulo se presenta el razonamiento con igualdades mediante reescritura.

2.1. Prueba mediante reescritura

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#).

```
-- En esta relación se muestra distintas pruebas de la transitividad de
-- la igualdad de los números reales: por reescritura, sustitución, con
-- lemas y automáticas.

-- -----
-- Ejercicio. Realizar las siguientes acciones:
-- 1. Importar la teoría de los números reales.
-- 2. Declarar x, y y z como variables sobre los números reales.
-- -----

import data.real.basic    -- 1
variables (x y z : ℝ)    -- 2

-- -----
-- Ejercicio. Demostrar que la igualdad en los reales es transitiva; es
-- decir, si x, y y z son números reales tales que x = y e y = z,
-- entonces x = z.
-- -----

-- 1ª demostración (con reescritura)
-- =====
```

```

example
  (h : x = y)
  (h' : y = z)
  : x = z :=
begin
  rw h,
  exact h',
end

-- Prueba:
/-
  x y z : ℝ,
  h : x = y,
  h' : y = z
  ⊢ x = z
rw h,
  ⊢ y = z
exact h',
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (rw h) cuando h es una igualdad sustituye en la
--   conclusión el término izquierdo de h por el derecho.
-- + La táctica (exact h) concluye la demostración si h es del tipo de
--   la conclusión.

-- 2ª demostración (con reescritura inversa)
-- =====

example
  (h : x = y)
  (h' : y = z)
  : x = z :=
begin
  rw ← h',
  exact h,
end

-- Prueba:
/-
  x y z : ℝ,
  h : x = y,
  h' : y = z
  ⊢ x = z

```



```

rw ← h',
  ⊢ x = y
exact h,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (rw ← h) cuando h es una igualdad sustituye en la
--   conclusión el término derecho de h por el izquierdo

-- 3ª demostración (con reescritura en hipótesis)
-- =====

example
  (h : x = y)
  (h' : y = z)
  : x = z :=
begin
  rw h' at h,
  exact h,
end

-- Prueba:
/-
  x y z : ℝ,
  h : x = y,
  h' : y = z
  ⊢ x = z
rw h' at h,
  h : x = z
  ⊢ x = z
exact h,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (rw h1 at h2) cuando h1 es una igualdad sustituye en la
--   hipótesis h2 el término izquierdo de h1 por el derecho.

-- 4ª demostración (con reescritura inversa en hipótesis)
-- =====

example
  (h : x = y)
  (h' : y = z)

```

```

: x = z :=
begin
  rw ← h at h',
  exact h',
end

-- Prueba:
/-
  x y z : ℝ,
  h : x = y,
  h' : y = z
  ⊢ x = z
rw ← h at h',
  h' : x = z
  ⊢ x = z
exact h',
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (rw ← h1 at h2) cuando h1 es una igualdad sustituye en la
--   hipótesis h2 el término derecho de h1 por el izquierdo

-- 5ª demostración (con un lema)
-- =====

example
  (h : x = y)
  (h' : y = z)
  : x = z :=
eq.trans h h'

-- Comentarios:
-- + Se ha usado el lema
--   + eq.trans : a = b → b = c → a = c
-- + El lema se puede encontrar con
--   by suggest

-- 6ª demostración (por sustitución)
-- =====

example
  (h : x = y)
  (h' : y = z)
  : x = z :=

```

```

h' ▶ h

-- Comentario:
-- + Si h es una igualdad entonces h ▶ h' es la expresión obtenida sustituyendo
--   en h' el término izquierdo de h por el derecho.

-- 7ª demostración (automática con linarith)
-- =====

example
  (h : x = y)
  (h' : y = z)
  : x = z :=
by linarith

-- Comentarios:
-- + La táctica linarith demuestra la conclusión mediante aritmética
--   lineal.
-- + La sugerencia de usar linarith se puede obtener escribiendo
--   by hint

-- 8ª demostración (automática con finish)
-- =====

example
  (h : x = y)
  (h' : y = z)
  : x = z :=
by finish

-- Comentario:
-- + La táctica finish demuestra la conclusión de forma automática.
-- + La sugerencia de usar finish se puede obtener escribiendo
--   by hint

```

2.2. Prueba con lemas y mediante encadenamiento de ecuaciones

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#).

```

-- En esta relación se presentan distintas pruebas con Lean de una
-- igualdad con productos de números reales. La primera es por
-- reescritura usando las propiedades asociativa y conmutativa, La
-- segunda es con encadenamiento de ecuaciones. Las restantes son
-- automáticas.

-----

-- Ejercicio. Sean  $a$ ,  $b$  y  $c$  números reales. Demostrar que
--  $(a * b) * c = b * (a * c)$ 
-----

import data.real.basic

variables (a b c : ℝ)

-- 1ª demostración (hacia atrás con rw)
-- =====

example : (a * b) * c = b * (a * c) :=
begin
  rw mul_comm a b,
  rw mul_assoc,
end

-- Prueba:
/-
  a b c : ℝ
  ⊢ (a * b) * c = b * (a * c)
rw mul_comm a b,
  ⊢ (b * a) * c = b * (a * c)
rw mul_assoc,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + Se han usado los lemas
--   + mul_comm :  $\forall (a b : \mathbb{R}), a * b = b * a$ 
--   + mul_assoc :  $\forall (a b c : \mathbb{R}), a * b * c = a * (b * c)$ 

-- 2ª demostración (encadenamiento de igualdades)
-- =====

example : (a * b) * c = b * (a * c) :=
begin
  calc (a * b) * c = (b * a) * c : by rw mul_comm a b

```

```

... = b * (a * c) : by rw mul_assoc,
end

-- 3ª demostración (automática con linarith)
-- =====

example : (a * b) * c = b * (a * c) :=
by linarith

-- 4ª demostración (automática con finish)
-- =====

example : (a * b) * c = b * (a * c) :=
by finish

-- 5ª demostración (automática con ring)
-- =====

example : (a * b) * c = b * (a * c) :=
by ring

-- Comentarios:
-- + La táctica ring demuestra la conclusión normalizando las
-- expresiones con las reglas de los anillos.

```

2.3. Teorema aritmético con hipótesis y uso de lemas

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#).

```

-- En esta relación comentan distintas pruebas con Lean de una igualdad
-- con productos de números reales. La primera es por reescritura usando
-- las propiedades asociativa y conmutativa, La segunda es con
-- encadenamiento de ecuaciones. Las restantes son automáticas.

-- -----
-- Ejercicio. Sean a, b, c y d números reales. Demostrar que si
--   c = d * a + b
--   b = a + d
-- entonces c = 2 * a * d.
-- -----

```

```

import data.real.basic

variables (a b c d : ℝ)

-- 1ª demostración (reescribiendo las hipótesis)
-- =====

example
  (h1 : c = d * a + b)
  (h2 : b = a * d)
  : c = 2 * a * d :=
begin
  rw h2 at h1,
  rw mul_comm at h1,
  rw ← two_mul (a * d) at h1,
  rw ← mul_assoc at h1,
  exact h1,
end

-- Prueba:
/-
  a b c d : ℝ,
  h1 : c = d * a + b,
  h2 : b = a * d
  ⊢ c = 2 * a * d
rw h2 at h1,
  h1 : c = d * a + a * d
  ⊢ c = 2 * a * d
rw mul_comm at h1,
  h1 : c = a * d + a * d
  ⊢ c = 2 * a * d
rw ← two_mul (a * d) at h1,
  h1 : c = 2 * (a * d)
  ⊢ c = 2 * a * d
rw ← mul_assoc at h1,
  h1 : c = 2 * a * d
  ⊢ c = 2 * a * d
exact h1,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + Se han usado los siguientes lemas
--   + mul_comm :  $\forall (a b : \mathbb{R}), a * b = b * a$ 

```

```

-- + mul_assoc :  $\forall (a\ b\ c : \mathbb{R}), a * b * c = a * (b * c)$ 
-- + two_mul :  $2 * a = a + a$ 

-- 2ª demostración (encadenamiento de ecuaciones)
-- =====

example
  (h1 : c = d * a + b)
  (h2 : b = a * d)
  : c = 2 * a * d :=
begin
  calc
    c      = d * a + b      : by exact h1
    ...    = d * a + a * d : by rw h2
    ...    = a * d + a * d : by rw mul_comm
    ...    = 2 * (a * d)    : by rw two_mul (a * d)
    ...    = 2 * a * d      : by rw mul_assoc,
end

-- 3ª demostración (encadenamiento de ecuaciones)
-- =====

example
  (h1 : c = d * a + b)
  (h2 : b = a * d)
  : c = 2 * a * d :=
begin
  calc
    c      = d * a + b      : by exact h1
    ...    = d * a + a * d : by rw h2
    ...    = 2 * a * d      : by ring,
end

-- 4ª demostración (automática con linarith)
-- =====

example
  (h1 : c = d * a + b)
  (h2 : b = a * d)
  : c = 2 * a * d :=
by linarith

```

2.4. Ejercicios sobre aritmética real

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```

-- En esta relación se comentan distintas pruebas con Lean de ejercicios
-- sobre la aritmética de los números reales. La primera es por
-- reescritura, la segunda es con encadenamiento de ecuaciones y las
-- restantes son automáticas.

-----

-- Ejercicio 1. Ejecutar las siguientes acciones:
-- 1. Importar la teoría de los números reales.
-- 2. Declarar a, b, c y d como variables sobre los reales.
-----

import data.real.basic      -- 1
variables (a b c d : ℝ)    -- 2

-----

-- Ejercicio 2. Demostrar que
--    $(c * b) * a = b * (a * c)$ 
--
-- Indicación: Para alguna prueba pueden ser útiles los lemas
-- + mul_assoc : (a * b) * c = a * (b * c)
-- + mul_comm  : a * b = b * a
-----

-- 1ª demostración
-- =====

example : (c * b) * a = b * (a * c) :=
begin
  rw mul_comm c b,
  rw mul_assoc,
  rw mul_comm c a,
end

-- Prueba:
/-
  a b c : ℝ
  ⊢ (c * b) * a = b * (a * c)
  rw mul_comm c b,
  ⊢ (b * c) * a = b * (a * c)
  rw mul_assoc,

```



```

  ⊢ b * (c * a) = b * (a * c)
rw mul_comm c a,
  no goals
-/

-- 2ª demostración
-- =====

example : (c * b) * a = b * (a * c) :=
begin
  calc (c * b) * a = (b * c) * a : by rw mul_comm c b
        ... = b * (c * a) : by rw mul_assoc
        ... = b * (a * c) : by rw mul_comm c a,
end

-- 3ª demostración
-- =====

example : (c * b) * a = b * (a * c) :=
by linarith

-- 4ª demostración
-- =====

example : (c * b) * a = b * (a * c) :=
by finish

-- 5ª demostración
-- =====

example : (c * b) * a = b * (a * c) :=
by ring

-----
-- Ejercicio 3. Demostrar que si
--   c = b * a - d
--   d = a * b
-- entonces c = 0.
--
-- Indicación: Para alguna pueba pueden ser útiles los lemas
-- + mul_comm : a * b = b * a
-- + sub_self : a - a = 0
-----

example

```

```

(h1 : c = b * a - d)
(h2 : d = a * b)
: c = 0 :=
begin
  rw h2 at h1,
  rw mul_comm b a at h1,
  rw sub_self (a * b) at h1,
  exact h1,
end

-- Prueba:
/-
  a b c d : ℝ,
  h1 : c = b * a - d,
  h2 : d = a * b
  ⊢ c = 0
rw h2 at h1,
  h1 : c = b * a - a * b
  ⊢ c = 0
rw mul_comm b a at h1,
  h1 : c = a * b - a * b
  ⊢ c = 0
rw sub_self (a * b) at h1,
  h1 : c = 0
  ⊢ c = 0
exact h1,
  no goals
-/

-- 2ª demostración
-- =====

example
  (h1 : c = b * a - d)
  (h2 : d = a * b)
  : c = 0 :=
begin
  calc c = b * a - d      : by rw h1
      ... = b * a - a * b : by rw h2
      ... = a * b - a * b : by rw mul_comm a b
      ... = 0             : by rw sub_self (a*b),
end

-- 3ª demostración
-- =====

```

```

example
  (h1 : c = b * a - d)
  (h2 : d = a * b)
  : c = 0 :=
begin
  calc c = b * a - d      : by rw h1
      ... = b * a - a * b : by rw h2
      ... = 0             : by ring,
end

-----
-- Ejercicio 4. Demostrar que
--   (a + b) + a = 2 * a + b
--
-- Indicación: Para alguna prueba pueden ser útiles los lemas
-- + add_assoc : (a + b) + c = a + (b + c)
-- + add_comm  : a + b = b + a
-- + two_mul   : 2 * a = a + a
--
-----

-- 1ª demostración
-- =====

example : (a + b) + a = 2 * a + b :=
begin
  calc (a + b) + a = a + (b + a) : by rw add_assoc
      ... = a + (a + b) : by rw add_comm b a
      ... = (a + a) + b : by rw ← add_assoc
      ... = 2 * a + b   : by rw two_mul,
end

-- 2ª demostración
-- =====

example : (a + b) + a = 2 * a + b :=
by ring

-----
-- Ejercicio 5. Demostrar que
--   (a + b) * (a - b) = a^2 - b^2
--
-- Indicación: Para alguna prueba pueden ser útiles los lemas
-- + add_mul : (a + b) * c = a * c + b * c
-- + add_sub : a + (b - c) = (a + b) - c

```

```

-- + add_zero : a + 0 = a
-- + mul_comm : a * b = b * a
-- + mul_sub   : a * (b - c) = a * b - a * c
-- + pow_two   : a^2 = a * a
-- + sub_self  : a - a = 0
-- + sub_sub   : (a - b) - c = a - (b + c)
-----

-- 1ª demostración
-- =====

example : (a + b) * (a - b) = a^2 - b^2 :=
begin
  rw pow_two a,
  rw pow_two b,
  rw mul_sub (a + b) a b,
  rw add_mul a b a,
  rw add_mul a b b,
  rw mul_comm b a,
  rw ← sub_sub,
  rw ← add_sub,
  rw sub_self,
  rw add_zero,
end

-- Prueba:
/-
  a b : ℝ
  ⊢ (a + b) * (a - b) = a ^ 2 - b ^ 2
rw pow_two a,
  ⊢ (a + b) * (a - b) = a * a - b ^ 2
rw pow_two b,
  ⊢ (a + b) * (a - b) = a * a - b * b
rw mul_sub (a + b) a b,
  ⊢ (a + b) * a - (a + b) * b = a * a - b * b
rw add_mul a b a,
  ⊢ a * a + b * a - (a + b) * b = a * a - b * b
rw add_mul a b b,
  ⊢ a * a + b * a - (a * b + b * b) = a * a - b * b
rw mul_comm b a,
  ⊢ a * a + a * b - (a * b + b * b) = a * a - b * b
rw ← sub_sub,
  ⊢ a * a + a * b - a * b - b * b = a * a - b * b
rw ← add_sub,
  ⊢ a * a + (a * b - a * b) - b * b = a * a - b * b

```

```

rw sub_self,
  ⊢ a * a + 0 - b * b = a * a - b * b
rw add_zero,
  no goals
-/

-- 2ª demostración
-- =====

example : (a + b) * (a - b) = a^2 - b^2 :=
begin
  calc (a + b) * (a - b)
    = (a + b) * a - (a + b) * b      : by rw mul_sub (a + b) a b
  ... = a * a + b * a - (a + b) * b  : by rw add_mul a b a
  ... = a * a + b * a - (a * b + b * b) : by rw add_mul a b b
  ... = a * a + a * b - (a * b + b * b) : by rw mul_comm b a
  ... = a * a + a * b - a * b - b * b   : by rw sub_sub
  ... = a * a + (a * b - a * b) - b * b : by rw add_sub
  ... = a * a + 0 - b * b               : by rw sub_self
  ... = a * a - b * b                   : by rw add_zero
  ... = a^2 - b * b                     : by rw pow_two a
  ... = a^2 - b^2                       : by rw pow_two b,
end

-- 3ª demostración
-- =====

example : (a + b) * (a - b) = a^2 - b^2 :=
by ring

```


Capítulo 3

Conectivas: implicación, equivalencia, conjunción y disyunción)

3.1. Reglas de la implicación

3.1.1. Eliminación de la implicación

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```
-- En este relación se muestra distintas formas de demostrar un teorema
-- con eliminación de la implicación.
```

```
-- -----
-- Ejercicio. Realizar las siguientes acciones:
-- 1. Importar la librería de tácticas.
-- 2. Declarar P y Q como variables sobre proposiciones.
-- -----
```

```
import tactic          -- 1
variables (P Q : Prop) -- 2
```

```
-- -----
-- Ejercicio. Demostrar que si se tiene  $(P \rightarrow Q)$  y  $P$ , entonces se tiene
--  $Q$ .
-- -----
```

```
-- 1ª demostración (hacia atrás)
-- =====
```

```

example
  (h1 : P → Q)
  (h2 : P)
  : Q :=
begin
  apply h1,
  exact h2,
end

-- Prueba:
/-
  P Q : Prop,
  h1 : P → Q,
  h2 : P
  ⊢ Q
apply h1,
  ⊢ P
exact h2,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (apply h), cuando h es una implicación, aplica la regla
--   de eliminación de la implicación; es decir, si h es (P → Q) y la
--   conclusión coincide con Q, entonces sustituye la conclusión por P.

-- 2ª demostración (hacia adelante)
-- =====

example
  (h1 : P → Q)
  (h2 : P)
  : Q :=
begin
  exact h1 h2,
end

-- Comentarios:
-- + Si h1 es una demostración de (P → Q) y h2 es una demostración de P,
--   entonces (h1 h2) es una demostración de Q.

-- 3ª demostración (simplificació de la 2ª)
-- =====

```



```

example
  (h1 : P → Q)
  (h2 : P)
  : Q :=
by exact h1 h2

-- 4ª demostración (mediante un término)
-- =====

example
  (h1 : P → Q)
  (h2 : P)
  : Q :=
h1 h2

-- 5ª demostración (automática con tauto)
-- =====

example
  (h1 : P → Q)
  (h2 : P)
  : Q :=
by tauto

-- Comentarios:
-- + La táctica tauto demuestra automáticamente las tautologías.

-- 6ª demostración (automática con finish)
-- =====

example
  (h1 : P → Q)
  (h2 : P)
  : Q :=
by finish

-- 6ª demostración (automática con solve_by_elim)
-- =====

example
  (h1 : P → Q)
  (h2 : P)
  : Q :=
by solve_by_elim

```

```
-- Comentarios:
-- + La táctica solve_by_elim intenta demostrar el objetivo aplicándole
-- reglas de eliminación.
```

3.1.2. Introducción de la implicación

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```
-- En este relación se muestra distintas formas de demostrar un teorema
-- con eliminación de la implicación.
```

```
-- -----
-- Ejercicio. Realizar las siguientes acciones:
-- 1. Importar la librería de tácticas.
-- 2. Declarar P como variable sobre proposiciones.
-- -----
```

```
import tactic          -- 1
variables (P : Prop)   -- 2
```

```
-- -----
-- Ejercicio. Demostrar que
--   P → P
-- -----
```

```
-- 1ª demostración
-- =====
```

```
example : P → P :=
begin
  intro h,
  exact h,
end
```

```
-- Prueba:
/-
```

```
  P : Prop
  ⊢ P → P
intro h,
  h : P
  ⊢ P
exact h,
  no goals
```

```

-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (intro h), cuando la conclusión es una implicación,
--   aplica la regla de introducción de la implicación; es decir, si la
--   conclusión es  $(P \rightarrow Q)$  entonces añade la hipótesis  $(h : P)$  y cambia
--   la conclusión a  $Q$ .

-- 3ª demostración (por un término)
-- =====

example : P → P :=
λ h, h

-- 4ª demostración (mediante id)
-- =====

example : P → P :=
id

-- Comentario: Se usa el lema
-- + id : P → P

-- 5ª demostración (estructurada)
-- =====

example : P → P :=
begin
  assume h : P,
  show P, from h,
end

-- 6ª demostración (estructurada)
-- =====

example : P → P :=
assume h, h

-- 7ª demostración (automática con tauto)
-- =====

example : P → P :=
by tauto

-- 8ª demostración (automática con finish)

```

```

-- =====

example : P → P :=
by finish

-- 9ª demostración (por simplificación)
-- =====

example : P → P :=
by simp

-- Comentarios:
-- + La táctica simp aplica reglas de simplificación a la conclusión.

```

3.2. Reglas de la equivalencia

3.2.1. Eliminación de la equivalencia

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```

-- En este relación se muestra distintas formas de demostrar un teorema
-- con eliminación de la equivalencia

-- -----
-- Ejercicio. Realizar las siguientes acciones:
-- 1. Importar la librería de tácticas.
-- 2. Declarar P, Q y R como variables sobre proposiciones.
-- -----

import tactic          -- 1
variables (P Q R : Prop) -- 2

-- -----
-- Ejercicio. Demostrar que si
--   P ↔ Q
--   Q → R
-- entonces
--   P → R
-- -----

-- 1ª demostración
-- =====

```

```

example
  (h : P ↔ Q)
  (hQR : Q → R)
  : P → R :=
begin
  intro hP,
  apply hQR,
  cases h with hPQ hQP,
  apply hPQ,
  exact hP,
end

-- Prueba:
/-
  P Q R : Prop,
  h : P ↔ Q,
  hQR : Q → R
  ⊢ P → R
intro hP,
  hP : P
  ⊢ R
apply hQR,
  ⊢ Q
cases h with hPQ hQP,
  hPQ : P → Q,
  hQP : Q → P
  ⊢ Q
apply hPQ,
  ⊢ P
exact hP,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (cases h with h1 h2), cuando la hipótesis h es una
--   equivalencia aplica la regla de eliminación de la equivalencia; es
--   decir, si h es (P ↔ Q), entonces elimina h y añade las hipótesis
--   (h1 : P → Q) y (h2 : Q → P).

-- 2ª demostración (simplificando los últimos pasos de la anterior)
-- =====

example
  (h : P ↔ Q)

```

```

(hQR : Q → R)
: P → R :=
begin
  intro hP,
  apply hQR,
  cases h with hPQ hQP,
  exact hPQ hP,
end

-- Prueba:
/-
  P Q R : Prop,
  h : P ↔ Q,
  hQR : Q → R
  ⊢ P → R
intro hP,
  hP : P
  ⊢ R
apply hQR,
  ⊢ Q
cases h with hPQ hQP,
  hPQ : P → Q,
  hQP : Q → P
  ⊢ Q
exact hPQ hP,
  no goals
-/

-- 3ª demostración (simplificando los últimos pasos de la anterior)
-- =====

example
(h : P ↔ Q)
(hQR : Q → R)
: P → R :=
begin
  intro hP,
  exact hQR (h.1 hP),
end

-- Comentarios:
-- + Si h es la equivalencia (P ↔ Q), entonces h.1 es (P → Q) y h.2 es
--   (Q → P).

-- 4ª demostración (por un término)

```

```

-- =====

example
  (h : P ↔ Q)
  (hQR : Q → R)
  : P → R :=
λ hP, hQR (h.1 hP)

-- 5ª demostración (por reescritura)
-- =====

example
  (h : P ↔ Q)
  (hQR : Q → R)
  : P → R :=
begin
  rw h,
  exact hQR,
end

-- Prueba:
/-
  P Q R : Prop,
  h : P ↔ Q,
  hQR : Q → R
  ⊢ P → R
rw h,
  ⊢ Q → R
exact hQR,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (rw h), cuando h es una equivalencia como (P ↔ Q),
--   sustituye en la conclusión P por Q.

-- 6ª demostración (por reescritura en hipótesis)
-- =====

example
  (h : P ↔ Q)
  (hQR : Q → R)
  : P → R :=
begin
  rw ← h at hQR,

```

```

    exact hQR,
end

-- Prueba:
/-
  P Q R : Prop,
  h : P ↔ Q,
  hQR : Q → R
  ⊢ P → R
rw ← h at hQR,
  hQR : P → R
  ⊢ P → R
exact hQR,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (rw ← h at h'), cuando h es una equivalencia como (P ↔ Q),
--   sustituye en la hipótesis h' la fórmula Q por P.

-- 7ª demostración (estructurada)
-- =====

example
  (h : P ↔ Q)
  (hQR : Q → R)
  : P → R :=
begin
  assume hP : P,
  have hQ : Q, from h.1 hP,
  show R, from hQR hQ,
end

-- Comentarios:
-- + La táctica (assume h : P), cuando la conclusión es de la forma
--   (P → Q), añade la hipótesis P y cambia la conclusión a Q.
-- + La táctica (have h : e) genera dos subobjetivos: el primero tiene
--   como conclusión e y el segundo tiene la conclusión actual pero se le
--   añade la hipótesis (h : e).
-- + la táctica (show P, from h) demuestra la conclusión con la prueba h.

-- 8ª demostración (estructurada)
-- =====

example

```



```

(h : P ↔ Q)
(hQR : Q → R)
: P → R :=
assume hP, hQR (h.1 hP)

-- 9ª demostración (automática)
-- =====

example
(h : P ↔ Q)
(hQR : Q → R)
: P → R :=
by tauto

```

3.3. Reglas de la conjunción

3.3.1. Eliminación de la conjunción

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```

-- En este relación se muestra distintas formas de demostrar un teorema
-- con eliminación de la conjunción.

import tactic
variables (P Q : Prop)

-- -----
-- Ejercicio. Demostrar que
--   P ∧ Q → P
-- -----

-- 1ª demostración (con intro, cases y exact)
-- =====

example : P ∧ Q → P :=
begin
  intro h,
  cases h with hP hQ,
  exact hP,
end

-- Prueba:

```

```

/-
  P Q : Prop
  ⊢ P ∧ Q → P
intro h,
  h : P ∧ Q
  ⊢ P
cases h with hP hQ,
  hP : P,
  hQ : Q
  ⊢ P
exact hP,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (cases h with h1 h2), cuando la hipótesis h es una
--   conjunción aplica la regla de eliminación de la conjunción; es
--   decir, si h es (P ∧ Q), entonces elimina h y añade las hipótesis
--   (h1 : P) y (h2 : Q).

-- 2ª demostración (con rintro y exact)
-- =====

example : P ∧ Q → P :=
begin
  rintro ⟨hP, hQ⟩,
  exact hP,
end

-- Prueba:
/-
  P Q : Prop
  ⊢ P ∧ Q → P
rintro ⟨hP, hQ⟩,
  hP : P,
  hQ : Q
  ⊢ P
exact hP,
  no goals
-/

-- Comentarios:
-- + La táctica (rintro ⟨h1, h2⟩), cuando la conclusión es una
--   implicación cuyo antecedente es una conjunción, aplica las reglas
--   de introducción de la implicación y de eliminación de la conjunción;

```

```

-- es decir, si la conclusión es  $(P \wedge Q \rightarrow R)$  entonces añade las
-- hipótesis  $(h1 : P)$  y  $(h2 : Q)$  y cambia la conclusión a  $R$ .

-- 3ª demostración (con rintro y assumption)
-- =====

example : P ∧ Q → P :=
begin
  rintro ⟨hP, hQ⟩,
  assumption,
end

-- Comentarios:
-- + la táctica assumption concluye la demostración si la conclusión
-- coincide con alguna de las hipótesis.

-- 4ª demostración (estructurada)
-- =====

example : P ∧ Q → P :=
begin
  assume h : P ∧ Q,
  show P, from h.1,
end

-- 5ª demostración (estructurada)
-- =====

example : P ∧ Q → P :=
assume h, h.1

-- 6ª demostración (con término de prueba)
-- =====

example : P ∧ Q → P :=
λ ⟨hP, _⟩, hP

-- 7ª demostración (con lema)
-- =====

example : P ∧ Q → P :=
and.left

-- Comentarios:
-- + Se usa el lema

```

```

--      and.left : P ∧ Q → P
-- + El lema se encuentra con
--      by library_search

-- 8ª demostración (automática con auto)
-- =====

example : P ∧ Q → P :=
by tauto

-- 9ª demostración (automática con finish)
-- =====

example : P ∧ Q → P :=
by finish

```

3.3.2. Introducción de la conjunción

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```

-- En este relación se muestra distintas formas de demostrar un teorema
-- con introducción de la conjunción.

-- -----
-- Ejercicio. Realizar las siguientes acciones:
-- 1. Importar la librería de tácticas.
-- 2. Declarar P y Q como variables sobre proposiciones.
-- -----

import tactic          -- 1
variables (P Q : Prop) -- 2

-- -----
-- Ejercicio. Demostrar que de P y (P → Q) se deduce P ∧ Q
-- -----

-- 1ª demostración
-- =====

example
  (hP : P)
  (hPQ : P → Q)
  : P ∧ Q :=

```

```

begin
  split,
  { exact hP },
  { apply hPQ,
    exact hP },
end

-- Comentario
-- -----

-- La táctica split, cuando la conclusión es una conjunción, aplica la
-- regla de eliminación de la conjunción; es decir, si la conclusión es
--  $(P \wedge Q)$ , entonces crea dos subobjetivos: el primero en el que la
-- conclusión es  $P$  y el segundo donde es  $Q$ .

-- 2ª demostración
-- =====

example
  (hP : P)
  (hPQ : P → Q)
  : P ∧ Q :=
begin
  split,
  { exact hP },
  { exact hPQ hP },
end

-- 3ª demostración
-- =====

example
  (hP : P)
  (hPQ : P → Q)
  : P ∧ Q :=
begin
  have hQ : Q := hPQ hP,
  show P ∧ Q, by exact ⟨hP, hQ⟩,
end

-- 4ª demostración
-- =====

example
  (hP : P)

```

```

(hPQ : P → Q)
: P ∧ Q :=
begin
  show P ∧ Q, by exact ⟨hP, hPQ hP⟩,
end

```

```

-- 4ª demostración
-- =====

```

```

example
(hP : P)
(hPQ : P → Q)
: P ∧ Q :=
begin
  exact ⟨hP, hPQ hP⟩,
end

```

```

-- 5ª demostración
-- =====

```

```

example
(hP : P)
(hPQ : P → Q)
: P ∧ Q :=
by exact ⟨hP, hPQ hP⟩

```

```

-- 6ª demostración
-- =====

```

```

example
(hP : P)
(hPQ : P → Q)
: P ∧ Q :=
⟨hP, hPQ hP⟩

```

```

-- 7ª demostración
-- =====

```

```

example
(hP : P)
(hPQ : P → Q)
: P ∧ Q :=
and.intro hP (hPQ hP)

```

```

-- Comentario: Se ha usado el lema

```

```
-- + and.intro : P → Q → P ∧ Q

-- 8ª demostración
-- =====

example
  (hP : P)
  (hPQ : P → Q)
  : P ∧ Q :=
by tauto
```

3.4. Reglas de la disyunción

3.4.1. Eliminación de la disyunción

- Enlaces al [código](#) y a la ([sesión en Lean Web](#))

```
-- En este relación se muestra distintas formas de demostrar un teorema
-- con eliminación de la disyunción

-----

-- Ejercicio. Realizar las siguientes acciones:
-- 1. Importar la librería de tácticas.
-- 2. Declarar P, Q y R como variables sobre proposiciones.
-----

import tactic          -- 1
variables (P Q R : Prop) -- 2

-----

-- Ejercicio. Demostrar que si
--   P → R y
--   Q → R
-- entonces
--   P ∨ Q → R
-----

-- 1ª demostración
-- =====

example
  (hPR : P → R)
```

```

(hQR : Q → R)
: P ∨ Q → R :=
begin
  intro h,
  cases h with hP hQ,
  { exact hPR hP },
  { exact hQR hQ },
end

-- Comentario
-- -----

-- La táctica (cases h with h1 h2), cuando la hipótesis h es una
-- disyunción aplica la regla de eliminación de la disyunción; es decir,
-- si h es (P ∨ Q), entonces elimina h y crea dos casos: uno añadiendo
-- la hipótesis (h1 : P) y otro añadiendo la hipótesis (h2 : Q).

-- 2ª demostración
-- =====

example
(hPR : P → R)
(hQR : Q → R)
: P ∨ Q → R :=
begin
  rintro (hP | hQ),
  { exact hPR hP },
  { exact hQR hQ },
end

-- Comentario
-- -----

-- La táctica (rintro (h1 | h2)), cuando la conclusión es una
-- implicación cuyo antecedente es una disyunción, aplica las reglas de
-- introducción de la implicación y de eliminación de la disyunción; es
-- decir, si la conclusión es (P ∨ Q → R) entonces crea dos casos: en el
-- primero añade la hipótesis (h1 : P) y cambia la conclusión a R; en el
-- segundo añade la hipótesis (h2 : Q) y cambia la conclusión a R.

-- 3ª demostración
-- =====

example
(hPR : P → R)

```



```

(hQR : Q → R)
: P ∨ Q → R :=
λ h, or.elim h hPR hQR

-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + or.elim : P ∨ Q → (P → R) → (Q → R) → R

-- 3ª demostración
-- =====

example
  (hPR : P → R)
  (hQR : Q → R)
  : P ∨ Q → R :=
or.rec hPR hQR

-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + or.rec : (P → R) → (Q → R) → P ∨ Q → R

-- 4ª demostración
-- =====

example
  (hPR : P → R)
  (hQR : Q → R)
  : P ∨ Q → R :=
by tauto

```

3.5. Ejercicios

3.5.1. Monotonía de la suma por la izquierda

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```

-----
-- Ejercicio. Demostrar que si  $a$ ,  $b$  y  $c$  son números reales tales que
--  $a \leq b$ , entonces  $c + a \leq c + b$ .
--
-- Indicación: Se puede usar el lema
--   sub_nonneg :  $0 \leq a - b \leftrightarrow b \leq a$ 
-----

```

```

import data.real.basic
variables {a b c : ℝ}

-- 1ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  have h : (c + b) - (c + a) = b - a,
  { ring, },
  { rw h,
    rw sub_nonneg,
    exact hab, },
end

-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + sub_nonneg : 0 ≤ a - b ↔ b ≤ a

-- 2ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  calc 0 ≤ b - a : by exact sub_nonneg.mpr hab
      ... = c + b - (c + a) : by exact (add_sub_add_left_eq_sub b a c).symm,
end

-- Comentario: Se usa el lema
-- + add_sub_add_left_eq_sub : c + a - (c + b) = a - b

-- 3ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  calc 0 ≤ b - a : sub_nonneg.mpr hab

```

```

    ... = c + b - (c + a) : (add_sub_add_left_eq_sub b a c).symm,
end

-- 4ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  calc 0 ≤ b - a      : sub_nonneg.mpr hab
    ... = c + b - (c + a) : ring
end

-- 5ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  simp,
  exact hab,
end

-- 6ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  simp [hab],
end

-- Comentario:
-- + La táctica (simp [h]) aplica reglas de simplificación, ampliadas con
--   h, a la conclusión.

-- 7ª demostración
-- =====

```

```

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
begin
  simp [hab],
end

-- 8ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
by simp [hab]

-- 9ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
add_le_add_left hab c

-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + add_le_add_left : a ≤ b → ∀ (c : ℝ), c + a ≤ c + b

-- 10ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
by linarith

-- 11ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : c + a ≤ c + b :=
by finish

```

3.5.2. Monotonía de la suma por la derecha

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```

-----
-- Ejercicio. Demostrar que si  $a$ ,  $b$  y  $c$  son números reales tales que
--  $a \leq b$ , entonces  $a + c \leq b + c$ .
-----

import data.real.basic
variables {a b c : ℝ}

-- 1ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  have h : (b + c) - (a + c) = b - a,
  { ring, },
  { rw h,
    rw sub_nonneg,
    exact hab, },
end

-- 2ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  calc 0 ≤ b - a : by exact sub_nonneg.mpr hab
      ... = b + c - (a + c) : by exact (add_sub_add_right_eq_sub b a c).symm,
end

-- Comentario: Se usa el lema
-- + add_sub_add_right_eq_sub :  $a + c - (b + c) = a - b$ 

-- 3ª demostración
-- =====

```

```

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  calc 0 ≤ b - a          : sub_nonneg.mpr hab
      ... = b + c - (a + c) : (add_sub_add_right_eq_sub b a c).symm,
end

-- 4ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  calc 0 ≤ b - a          : sub_nonneg.mpr hab
      ... = b + c - (a + c) : by ring,
end

-- 5ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  simp,
  exact hab,
end

-- 6ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
begin
  rw ← sub_nonneg,
  simp [hab],
end

-- 7ª demostración

```

```

-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
begin
  simp [hab],
end

-- 8ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
by simp [hab]

-- 9ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
add_le_add_right hab c

-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + add_le_add_right : a ≤ b → ∀ (c : ℝ), a + c ≤ b + c

-- 10ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
by linarith

-- 11ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  : a + c ≤ b + c :=
by finish

```

3.5.3. La suma de no negativos es expansiva

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```
-- Ejercicio 1.. Demostrar si a y b son números reales y a es no
-- negativo, entonces  $b \leq a + b$ 
```

```
import data.real.basic
variables {a b : ℝ}
```

```
-- 1ª demostración
-- =====
```

```
example
  (ha : 0 ≤ a)
  : b ≤ a + b :=
begin
  calc b = 0 + b : by rw zero_add
    ... ≤ a + b : by exact add_le_add_right ha b,
end
```

```
-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + zero_add : 0 + a = a
```

```
-- 2ª demostración
-- =====
```

```
example
  (ha : 0 ≤ a)
  : b ≤ a + b :=
begin
  calc b = 0 + b : (zero_add b).symm
    ... ≤ a + b : add_le_add_right ha b,
end
```

```
-- 3ª demostración
-- =====
```

```
example
  (ha : 0 ≤ a)
  : b ≤ a + b :=
begin
  calc b = 0 + b : by ring
```



```

    ... ≤ a + b : by exact add_le_add_right ha b,
end

-- 4ª demostración
-- =====

example
  (ha : 0 ≤ a)
  : b ≤ a + b :=
by simp [ha]

-- 5ª demostración
-- =====

example
  (ha : 0 ≤ a)
  : b ≤ a + b :=
by linarith

-- 6ª demostración
-- =====

example
  (ha : 0 ≤ a)
  : b ≤ a + b :=
by finish

-- 7ª demostración
-- =====

example
  (ha : 0 ≤ a)
  : b ≤ a + b :=
le_add_of_nonneg_left ha

-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + le_add_of_nonneg_left : 0 ≤ b → a ≤ b + a

-----
-- Ejercicio 2. Demostrar si a y b son números reales y b es no
-- negativo, entonces  $a \leq a + b$ 
-----

-- 1ª demostración
-- =====

```

```

example
  (hb : 0 ≤ b)
  : a ≤ a + b :=
begin
  calc a = a + 0 : by rw add_zero
    ... ≤ a + b : by exact add_le_add_left hb a,
end

-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + add_le_add_left : a ≤ b → ∀ (c : ℝ), c + a ≤ c + b

-- 2ª demostración
-- =====

example
  (hb : 0 ≤ b)
  : a ≤ a + b :=
begin
  calc a = a + 0 : (add_zero a).symm
    ... ≤ a + b : add_le_add_left hb a,
end

-- 3ª demostración
-- =====

example
  (hb : 0 ≤ b)
  : a ≤ a + b :=
begin
  calc a = a + 0 : by ring
    ... ≤ a + b : add_le_add_left hb a,
end

-- 4ª demostración
-- =====

example
  (hb : 0 ≤ b)
  : a ≤ a + b :=
by simp [hb]

-- 5ª demostración
-- =====

```

```

example
  (hb : 0 ≤ b)
  : a ≤ a + b :=
by linarith

-- 6ª demostración
-- =====

example
  (hb : 0 ≤ b)
  : a ≤ a + b :=
by finish

-- 7ª demostración
-- =====

example
  (hb : 0 ≤ b)
  : a ≤ a + b :=
le_add_of_nonneg_right hb

-- Comentario: Se usa el lema
-- + le_add_of_nonneg_right : 0 ≤ b → a ≤ a + b

```

3.5.4. Suma de no negativos

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```

-----
-- Ejercicio 1. Demostrar si a y b son números reales no negativos,
-- entonces a + b es no negativo.
-----

import data.real.basic

variables (a b : ℝ)

-- 1ª demostración
-- =====

example
  (ha : 0 ≤ a)
  (hb : 0 ≤ b)

```

```

: 0 ≤ a + b :=
begin
  calc 0 ≤ a      : ha
      ... ≤ a + b : le_add_of_nonneg_right hb,
end

-- 2ª demostración
-- =====

example
  (ha : 0 ≤ a)
  (hb : 0 ≤ b)
  : 0 ≤ a + b :=
add_nonneg ha hb

-- Comentario: Se usa el lema
-- + add_nonneg : 0 ≤ a → 0 ≤ b → 0 ≤ a + b

-- 3ª demostración
-- =====

example
  (ha : 0 ≤ a)
  (hb : 0 ≤ b)
  : 0 ≤ a + b :=
by linarith

```

3.5.5. Suma de desigualdades

- Enlaces al [código](#) y a la [sesión en Lean Web](#)

```

-- -----
-- Ejercicio. Demostrar si a, b, c y d son números reales tales que
-- a ≤ b y c ≤ d, entonces a + c ≤ b + d.
-- -----

```

```

import data.real.basic

variables (a b c d : ℝ)

-- 1ª demostración
-- =====

```

```

example
  (hab : a ≤ b)
  (hcd : c ≤ d)
  : a + c ≤ b + d :=
begin
  calc
    a + c ≤ b + c : add_le_add_right hab c
    ...      ≤ b + d : add_le_add_left hcd b,
end

-- 2ª demostración
example
  (hab : a ≤ b)
  (hcd : c ≤ d)
  : a + c ≤ b + d :=
begin
  have h1 : a + c ≤ b + c :=
    add_le_add_right hab c,
  have h2 : b + c ≤ b + d :=
    add_le_add_left hcd b,
  show a + c ≤ b + d,
  from le_trans h1 h2,
end

-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + le_trans: a ≤ b → b ≤ c → a ≤ c

-- 3ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  (hcd : c ≤ d)
  : a + c ≤ b + d :=
add_le_add hab hcd

-- Comentario: Se ha usado el lema
-- + add_le_add : a ≤ b → c ≤ d → a + c ≤ b + d

-- 4ª demostración
-- =====

example
  (hab : a ≤ b)
  (hcd : c ≤ d)

```

```
: a + c ≤ b + d :=  
by linarith
```

Capítulo 4

Apéndices

4.1. Resumen de tácticas usadas

- `(apply h)`, cuando h es una implicación, aplica la regla de eliminación de la implicación; es decir, si h es $(P \rightarrow Q)$ y la conclusión coincide con Q , entonces sustituye la conclusión por P .
- `assumption` concluye la demostración si la conclusión coincide con alguna de las hipótesis.
- `exact h` concluye la demostración si h es del tipo de la conclusión.
- `(cases h with h1 h2)`, cuando la hipótesis h es una equivalencia aplica la regla de eliminación de la equivalencia; es decir, si h es $(P \leftrightarrow Q)$, entonces elimina h y añade las hipótesis $(h1 : P \rightarrow Q)$ y $(h2 : Q \rightarrow P)$.
- `(cases h with h1 h2)`, cuando la hipótesis h es una conjunción aplica la regla de eliminación de la conjunción; es decir, si h es $(P \wedge Q)$, entonces elimina h y añade las hipótesis $(h1 : P)$ y $(h2 : Q)$.
- `(cases h with h1 h2)`, cuando la hipótesis h es una disyunción aplica la regla de eliminación de la disyunción; es decir, si h es $(P \vee Q)$, entonces elimina h y crea dos casos: uno añadiendo la hipótesis $(h1 : P)$ y otro añadiendo la hipótesis $(h2 : Q)$.
- `intro h`, cuando la conclusión es una implicación, aplica la regla de introducción de la implicación; es decir, si la conclusión es $(P \rightarrow Q)$ entonces añade la hipótesis $(h : P)$ y cambia la conclusión a Q .
- `finish` demuestra la conclusión de forma automática.
- `linarith` demuestra la conclusión mediante aritmética lineal.

- `ring` demuestra la conclusión normalizando las expresiones con las reglitas de los anillos.
- `rintro (h1, h2)`, cuando la conclusión es una implicación cuyo antecedente es una conjunción, aplica las reglas de introducción de la implicación y de eliminación de la conjunción; es decir, si la conclusión es $(P \wedge Q \rightarrow R)$ entonces añade las hipótesis $(h1 : P)$ y $(h2 : Q)$ y cambia la conclusión a R .
- `rintro (h1 | h2)`, cuando la conclusión es una implicación cuyo antecedente es una disyunción, aplica las reglas de introducción de la implicación y de eliminación de la disyunción; es decir, si la conclusión es $(P \vee Q \rightarrow R)$ entonces crea dos casos: en el primero añade la hipótesis $(h1 : P)$ y cambia la conclusión a R ; en el segundo añade la hipótesis $(h2 : Q)$ y cambia la conclusión a R .
- `rw h` cuando h es una igualdad sustituye en la conclusión el término izquierdo de h por el derecho.
- `rw h`, cuando h es una equivalencia como $(P \leftrightarrow Q)$, sustituye en la conclusión P por Q .
- `rw ← h` cuando h es una igualdad sustituye en la conclusión el término derecho de h por el izquierdo.
- `rw h at h'` cuando h es una igualdad sustituye en la hipótesis h' el término izquierdo de h por el derecho.
- `rw h at h'` cuando h es una equivalencia como $(P \leftrightarrow Q)$ sustituye en la hipótesis h' la fórmula P por Q .
- `rw ← h at h'` cuando h es una igualdad sustituye en la hipótesis h' el término derecho de h por el izquierdo.
- `rw ← h at h'` cuando h es una equivalencia como $(P \leftrightarrow Q)$ sustituye en la hipótesis h' la fórmula Q por P .
- `simp` aplica reglas de simplificación a la conclusión.
- `simp [h]` aplica reglas de simplificación, ampliadas con h , a la conclusión.
- `solve_by_elim` intenta demostrar el objetivo aplicándole reglas de eliminación.

- `split`, cuando la conclusión es una conjunción, aplica la regla de eliminación de la conjunción; es decir, si la conclusión es $(P \wedge Q)$, entonces crea dos subobjetivos: el primero en el que la conclusión es P y el segundo donde es Q .
- `tauto` demuestra automáticamente las tautologías.

4.1.1. Demostraciones estructuradas

- `(assume h : P)`, cuando la conclusión es de la forma $(P \rightarrow Q)$, añade la hipótesis P y cambia la conclusión a Q .
- `(have h : e)` genera dos subobjetivos: el primero tiene como conclusión e y el segundo tiene la conclusión actual pero se le añade la hipótesis $(h : e)$.
- `show P, from h` demuestra la conclusión con la prueba h .

4.1.2. Composiciones y descomposiciones

- Si $h1$ es una demostración de $(P \rightarrow Q)$ y $h2$ es una demostración de P , entonces $(h1 \ h2)$ es una demostración de Q .
- Si h es la conjunción $(P \wedge Q)$, entonces $h.1$ es P y $h.2$ es Q .
- Si h es la equivalencia $(P \leftrightarrow Q)$, entonces $h.1$ es $(P \rightarrow Q)$ y $h.2$ es $(Q \rightarrow P)$.
- Si h es una igualdad entonces $h \triangleright h'$ es la expresión obtenida sustituyendo en h' el término izquierdo de h por el derecho.

4.2. Resumen de teoremas usados

Los teoremas utilizados son los siguientes:

```
+ add_assoc : (a + b) + c = a + (b + c)
+ add_comm : a + b = b + a
+ add_le_add : a ≤ b → c ≤ d → a + c ≤ b + d
+ add_le_add_left : a ≤ b → ∀ (c : ℝ), c + a ≤ c + b
+ add_le_add_right : a ≤ b → ∀ (c : ℝ), a + c ≤ b + c
+ add_mul : (a + b) * c = a * c + b * c
+ add_nonneg : 0 ≤ a → 0 ≤ b → 0 ≤ a + b
+ add_sub : a + (b - c) = (a + b) - c
+ add_sub_add_left_eq_sub : c + a - (c + b) = a - b
```

```

+ add_sub_add_right_eq_sub : a + c - (b + c) = a - b
+ add_zero : a + 0 = a
+ and.intro : P → Q → P ∧ Q
+ and.left : P ∧ Q → P
+ eq.trans : a = b → b = c → a = c
+ id : P → P
+ le_add_of_nonneg_left : 0 ≤ b → a ≤ b + a
+ le_add_of_nonneg_right : 0 ≤ b → a ≤ a + b
+ le_trans : a ≤ b → b ≤ c → a ≤ c
+ mul_assoc : (a * b) * c = a * (b * c)
+ mul_comm : a * b = b * a
+ mul_sub : a * (b - c) = a * b - a * c
+ or.elim : P ∨ Q → (P → R) → (Q → R) → R
+ or.rec : (P → R) → (Q → R) → P ∨ Q → R
+ pow_two : a^2 = a * a
+ sub_nonneg : 0 ≤ a - b ↔ b ≤ a
+ sub_self : a - a = 0
+ sub_sub : (a - b) - c = a - (b + c)
+ two_mul : 2 * a = a + a
+ zero_add : 0 + a = a

```

4.3. Estilos de demostración

Demostración con tácticas	Demostración estructurada	Término de prueba en bruto
intro x, intro h, have k := _, let x := _, exact (_ : P)	fix x, assume h, have k := _, let x := _ in show P, from _ _ : P	λ x, λ h, have k := _, let x := _ in _

- intro x equivale a λ x, _
- apply f equivale a f _ _
- refine e1 (e2 _) (e3 _) equivale a e1 (e2 _) (e3 _)
- exact e equivale a e
- change e equivale a (_ : e)
- rw h equivale a eq.rec_on h _

- `induction e` equivale a `T.rec_on foo _ _` donde `T` es el tipo de `e`
- `cases e` equivale a `T.cases_on e _ _` donde `T` es el tipo de `e`
- `split` equivale a `and.intro _ _`
- `have x : t =` equivale a `(λ x, _) t`
- `let x : t =` equivale a `let x : t in _ =`
- `revert x` equivale a `_ x`