

1 Reglas de creación de zonas

- Zona IPv4:

$$\begin{aligned} R_4 (\leftrightarrow R_4) \star &= Z_4 \\ \Downarrow \\ A1 \diamond N1 \leftrightarrow R_4 (\leftrightarrow R_4) \star \leftrightarrow N2 \diamond A2 &= A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2 \end{aligned}$$

- Zona IPv6:

$$\begin{aligned} R_6 (\leftrightarrow R_6) \star &= Z_6 \\ \Downarrow \\ A1 \diamond N1 \leftrightarrow R_6 (\leftrightarrow R_6) \star \leftrightarrow N2 \diamond A2 &= A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2 \end{aligned}$$

- Zona dual:

$$\begin{aligned} R_d (\leftrightarrow R_d) \star &= Z_d \\ \Downarrow \\ A1 \diamond N1 \leftrightarrow R_d (\leftrightarrow R_d) \star \leftrightarrow N2 \diamond A2 &= A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_d \leftrightarrow N2 \diamond A2 \end{aligned}$$

- Zona vacía:

$$A1 \diamond N1 \leftrightarrow N2 \diamond A2 = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_d \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

2 Operadores de conexión

- Operador de conexión dual (\otimes_d):

$$Z_i \leftrightarrow R_d (\leftrightarrow R_d) \star \leftrightarrow Z_j = Z_i \leftrightarrow Z_d \leftrightarrow Z_j = Z_i \otimes_d Z_j$$

donde $Z_i, Z_j \in \{Z_4, Z_6\}$

- Operador de conexión IPv4 con traducción de direcciones IPv4 (\odot_4):

$$Z_i \leftrightarrow R_4^t \leftrightarrow Z_j = Z_i \odot_4 Z_j$$

- Operador de conexión dual con traducción de direcciones IPv4 (\odot_d):

$$Z_i \leftrightarrow (Z_d \leftrightarrow) \star R_d^t (\leftrightarrow Z_d) \star \leftrightarrow Z_j = Z_i \odot_d Z_j$$

donde $Z_i, Z_j \in \{Z_4, Z_6\}$

- Operador de conexión dual con traducción de protocolos IPv4 e IPv6 (\boxtimes_d):

$$Z_i \leftrightarrow (Z_d \leftrightarrow) \star R_{d,TP} (\leftrightarrow Z_d) \star \leftrightarrow Z_j = Z_i \boxtimes_d Z_j$$

donde $Z_i, Z_j \in \{Z_4, Z_6\}, Z_i \neq Z_j$

- Operador de conexión dual con traducción de direcciones IPv4 y traducción de protocolos IPv4 e IPv6 (\boxdot_d):

$$Z_i \leftrightarrow (Z_d \leftrightarrow) \star R_{d,TP}^t (\leftrightarrow Z_d) \star \leftrightarrow Z_j = Z_i \boxdot_d Z_j$$

donde $Z_i, Z_j \in \{Z_4, Z_6\}, Z_i \neq Z_j$

3 Canonización

- Conexión de zonas IPv4 utilizando \otimes_d :

$$Z_4 (\otimes_d Z_4) = Z_4$$

- Conexión de zonas IPv4 utilizando \odot_d :

$$Z_4 (\odot_d Z_4) = Z_4 \odot_4 Z_4$$

- Conexión de zonas IPv4 utilizando \boxdot_d :

$$Z_4 (\boxdot_d Z_4) = Z_4 \odot_4 Z_4$$

- Conexión de zonas IPv6 utilizando \otimes_d :

$$Z_6 (\otimes_d Z_6) \star = Z_6$$

- Conexión de zonas IPv6 utilizando \boxtimes_d :

$$Z_6 (\boxtimes_d Z_6) \star = Z_6 (\otimes_d Z_6) \star = Z_6$$

- Conexión de zonas IPv6 utilizando \odot_d ó \boxdot_d :

$$Z_6 \boxdot_d Z_6 = Z_6 \odot_d Z_6 = Z_6$$

- Conexión de zonas duales utilizando \otimes_d :

$$Z_d (\otimes_d Z_d) \star = Z_d$$

- Conexión de una zona dual en una posición intermedia utilizando \otimes_d :

$$Z_i \otimes_d Z_d (\otimes_d Z_d) \star \otimes_d Z_j = Z_i \otimes_d Z_j$$

donde $Z_i, Z_j \in \{Z_4, Z_6, Z_d\}$

4 Transformaciones de escenarios de transición

4.1. Mecanismos de transición entre zonas

4.1.1. Túneles manuales

- IPv4 dentro de IPv6:

$$T_{v6(v4)}(A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_6 op_2 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1, op_2 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d\}$

$$T_{v6(v4)}(A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_6 op_2 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 \odot_4 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d\}, op_2 \in \{\odot_d, \square_d\}$

$$T_{v6(v4)}(A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_6 op_2 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 \odot_4 Z_4 \odot_4 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1, op_2 \in \{\odot_d, \square_d\}$

- IPv6 dentro de IPv4:

$$T_{v4(v6)}(A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 op_2 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1, op_2 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \square_d\}$

- IPv6 dentro de UDP IPv4:

$$T_{udp(v4(v6))}(A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 (\odot_4 Z_4) \star op_2 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1, op_2 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \square_d\}$

4.1.2. Broker de túneles

- IPv4 dentro de IPv6:

$$Broker_{v6(v4)}(A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_6 op_2 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1, op_2 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d\}$

$$Broker_{v6(v4)}(A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_6 op_2 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 \odot_4 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d\}, op_2 \in \{\odot_d, \square_d\}$

$$Broker_{v6(v4)}(A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_6 op_2 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 \odot_4 Z_4 \odot_4 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1, op_2 \in \{\odot_d, \square_d\}$

- IPv6 dentro de IPv4:

$$Broker_{v4(v6)} (A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 op_2 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1, op_2 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \square_d\}$

- IPv6 dentro de UDP IPv4:

$$Broker_{udp(v4(v6))} (A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 (\odot_4 Z_4) \star op_2 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1, op_2 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \square_d\}$

4.1.3. Túneles 6to4

$$6to4 (A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 op_2 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1, op_2 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \square_d\}$

4.2. Mecanismos de transición entre zona y nodo terminal

4.2.1. Túneles manuales

- IPv4 dentro de IPv6:

$$T_{v6(v4)} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d\}$

$$T_{v6(v4)} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_4 \odot_4 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\odot_d, \square_d\}$

- IPv6 dentro de IPv4:

$$T_{v4(v6)} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \square_d\}$

- IPv6 dentro de UDP IPv4:

$$T_{udp(v4(v6))} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_4 (\odot_4 Z_4) \star op_1 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \square_d\}$

4.2.2. Broker de túneles

- IPv4 dentro de IPv6:

$$Broker_{v6(v4)} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d\}$

$$Broker_{v6(v4)} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_4 \odot_4 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\odot_d, \boxdot_d\}$

- IPv6 dentro de IPv4:

$$Broker_{v4(v6)} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \boxdot_d\}$

- IPv6 dentro de UDP IPv4:

$$Broker_{udp(v4(v6))} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_4 (\odot_4 Z_4) \star op_1 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \boxdot_d\}$

4.2.3. DSTM

$$DSTM (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d\}$

$$DSTM (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_6 op_1 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_4 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\odot_d, \boxdot_d\}$

4.2.4. Teredo

$$Teredo (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_4 (\odot_4 Z_4) \star op_1 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N1 \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d, \odot_d, \boxdot_d\}$

4.2.5. ISATAP

$$ISATAP (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_4 op_1 Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N2 \diamond A2$$

donde $op_1 \in \{\otimes_d, \boxtimes_d\}$

4.3. Mecanismos de transición entre nodos terminales

4.3.1. Túneles manuales

- IPv4 dentro de IPv6:

$$T_{v6(v4)} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow \underline{N_d} \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_4 \leftrightarrow N_d \diamond A2$$

- IPv6 dentro de IPv4:

$$T_{v4(v6)} (A1 \diamond \underline{N_d} \leftrightarrow Z_4 \leftrightarrow \underline{N_d} \diamond A2) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N_d \diamond A2$$

- IPv6 dentro de UDP IPv4:

$$T_{udp(v4(v6))} \left(A1 \diamond N_d \leftrightarrow \underline{Z_4 (\odot_4 Z_4) \star} \leftrightarrow N_d \diamond A2 \right) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N_d \diamond A2$$

4.3.2. ISATAP

$$ISATAP \left(A1 \diamond \underline{N_d \leftrightarrow Z_4 \leftrightarrow N_d} \diamond A2 \right) = A1 \diamond N_d \leftrightarrow Z_6 \leftrightarrow N_d \diamond A2$$

5 Mecanismos de transición

6 Implementaciones alternativas

- Otras canonizaciones:

$$Z_4 \otimes_d Z_4 = Z_4$$

$$Z_4 \odot_4 Z_4 = Z_4 \odot_4 Z_4$$

$$Z_4 \odot_d Z_4 = Z_4 \odot_4 Z_4$$

$$Z_4 \boxtimes_d Z_4 = Z_4$$

$$Z_4 \boxdot_d Z_4 = Z_4 \odot_4 Z_4$$

- Página 188:

Zonas IPv4	Resultado
$Z_4 \leftrightarrow R_4$	Z_4
$Z_4 \leftrightarrow R_6$	<i>error</i>
$Z_4 \leftrightarrow R_d$	$Z_4 \otimes_d Z_d$
$Z_4 \leftrightarrow R_4^t$	$Z_4 \odot_4 Z_4$
$Z_4 \leftrightarrow R_d^t$	$Z_4 \odot_d Z_d$
$Z_4 \leftrightarrow R_{d,TP}$	$Z_4 \boxtimes_d Z_d$
$Z_4 \leftrightarrow R_{d,TP}^t$	$Z_4 \boxdot_d Z_d$

Zonas IPv6	Resultado
$Z_6 \leftrightarrow R_4$	<i>error</i>
$Z_6 \leftrightarrow R_6$	Z_6
$Z_6 \leftrightarrow R_d$	$Z_6 \otimes_d Z_d$
$Z_6 \leftrightarrow R_4^t$	<i>error</i>
$Z_6 \leftrightarrow R_d^t$	$Z_6 \odot_d Z_d$
$Z_6 \leftrightarrow R_{d,TP}$	$Z_6 \boxtimes_d Z_d$
$Z_6 \leftrightarrow R_{d,TP}^t$	$Z_6 \boxdot_d Z_d$

Zonas duales	Resultado
$Z_d \leftrightarrow R_4$	$Z_d \otimes_d Z_4$
$Z_d \leftrightarrow R_6$	$Z_d \otimes_d Z_6$
$Z_d \leftrightarrow R_d$	Z_d
$Z_d \leftrightarrow R_4^t$	$Z_d \odot_4 Z_4$
$Z_d \leftrightarrow R_d^t$	$Z_d \odot_d Z_d$
$Z_d \leftrightarrow R_{d,TP}$	$Z_d \boxtimes_d Z_d$
$Z_d \leftrightarrow R_{d,TP}^t$	$Z_d \boxdot_d Z_d$

	R_4	R_6	R_d	R_4^t	R_d^t	$R_{d,TP}$	$R_{d,TP}^t$
Z_4	Z_4	<i>error</i>	$Z_4 \otimes_d Z_d$	$Z_4 \odot_4 Z_4$	$Z_4 \odot_d Z_d$	$Z_4 \boxtimes_d Z_d$	$Z_4 \boxdot_d Z_d$
Z_6	<i>error</i>	Z_6	$Z_6 \otimes_d Z_d$	<i>error</i>	$Z_6 \odot_d Z_d$	$Z_6 \boxtimes_d Z_d$	$Z_6 \boxdot_d Z_d$
Z_d	$Z_d \otimes_d Z_4$	$Z_d \otimes_d Z_6$	Z_d	$Z_d \odot_4 Z_4$	$Z_d \odot_d Z_d$	$Z_d \boxtimes_d Z_d$	$Z_d \boxdot_d Z_d$

7 Tipos en Haskell

OpD	\otimes_d
Op4t	\odot_4
OpDt	\odot_d
OpDtp	\boxtimes_d
OpDtpt	\boxdot_d