Ejercicios 1-13'

Luis Gerardo Arruti Sebastian
Sergio Rosado Zúñiga
Eduardo León Rodríguez

1.

2. Sean $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ una categoría pre-triangulada y $X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX$ en $\triangle$. Pruebe que $u \in SKer(v)$, $\quad v \in SCoKer(u) \cap SKer(w)$ y $w \in SCoKer(v)$.

   Demostración. Primero se probará que $u \in SKer(v)$.
   Por el teorema (1.2.a) se tiene que $vu = 0$.

   Sea $r : M \to Y$ tal que $vr = 0$. Como $M \in \mathscr{C}$, entonces por el teorema (TR1a) $M \xrightarrow{1_M} M \longrightarrow 0 \longrightarrow TM$ está en $\triangle$, y por (TR2) se puede rotar el triangulo de las hipótesis tal se tiene el siguiente diagrama:

$$\begin{tikzcd}
M \arrow[r, "1_M"] \arrow[d, "r"'] & 0 \arrow[r] \arrow[d, "0"'] & T(M) \arrow[r, "-T(1_M)"] & TM \arrow[d, "T(r)"] \\
Y \arrow[r, "v"'] & Z \arrow[r, "w"'] & T(x) \arrow[r, "-T(u)"'] & T(y)\,.
\end{tikzcd}$$

   Así, por (TR3) existe $s' : T(M) \to T(X)$ tal que $(T(r))(-T(1_M)) = (-T(u))(s')$, y como T es autofuntor, entonces $-T(r \circ 1_M)) = -T(u \circ T^{-1}(s'))$. Si se toma $s = T^{-1}(s') : M \to X$ se tiene que $r = us$, por lo tanto $u \in SKer(v)$.

   Veamos ahora que $v \in SCoker(u)$.

   Anteriormente se observó que $vu = 0$. Sea $t : Y \to M$ tal que $tu = 0$. Como $M \in \mathscr{C}$, entonces por el teorema (TR1a) $M \xrightarrow{1_M} M \longrightarrow 0 \longrightarrow TM$ está en $\triangle$, así por (TR2) $0 = T^{-1}(0) \xrightarrow[0]{} M \xrightarrow[1_M]{} M \longrightarrow 0$ está en $\triangle$.

   Además, como $tu = 0$ entonces entonces se tiene el siguiente diagrama:

$$\begin{tikzcd}
X \arrow[r, "u"] \arrow[d, "0"] & Y \arrow[r, "v"] \arrow[d, "t"] & Z \arrow[r, "w"] & TX \arrow[d, "T(0)=0"] \\
0 \arrow[r, "0"'] & M \arrow[r, "1_M"'] & M \arrow[r] & 0.
\end{tikzcd}$$

Así, por (TR3) existe $s : Z \to M$ tal que $1_M \circ t = sv$ y por lo tanto $v \in SCoKer(u)$.

Por último, rotando el triángulo de las hipótesis por (TR1c) se tiene que $Y \xrightarrow[v]{} Z \xrightarrow[w]{} T(x) \xrightarrow[-T(u)]{} T(y)$ está en $\triangle$, así por lo demostrado $v \in Ker(w)$ y $w \in CoKer(v)$.

$\square$

3. Sean $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ una categoría pre-triangulada y $(f, g, h) : \eta \to \mu$ en $T(\mathscr{C}, T)$, con $\eta, \mu \in \triangle$. Pruebe que si dos de los tres morfismos f, g y h son isos, entonces el tercero también lo es.

Demostración.

a) Caso 1. Si f y g son isos en $\mathscr{C}$, entonces por el teorema 1.2(c) se concluye que h es iso en $\mathscr{C}$.

b) Suponga que f y h son isos en $\mathscr{C}$. Se inicia con la siguiente situación:

$$\begin{tikzcd}
X \arrow[r, "u"] \arrow[d, "f"] & Y \arrow[r, "v"] \arrow[d, "g"] & Z \arrow[r, "w"] \arrow[d, "h"] & TX \arrow[d, "Tf"] \\
A \arrow[r, "a"] & B \arrow[r, "b"] & C \arrow[r, "c"] & TA
\end{tikzcd}$$

después de aplicar una rotación a la izquierda (por 1.3) a los triángulos η y μ, se obtiene la siguiente situación:

$$\begin{tikzcd}
T^{-1}Z \arrow[r, "-T^{-1}w"] \arrow[d, "T^{-1}h"'] & X \arrow[r, "u"] \arrow[d, "f"] & Y \arrow[r, "v"] \arrow[d, "g"] & Z \arrow[d, "h"] \\
T^{-1}C \arrow[r, "-T^{-1}c"] & A \arrow[r, "a"] & B \arrow[r, "b"] & C
\end{tikzcd}$$

dado que $-T^{-1}c \circ T^{-1}h = -(T^{-1}c \circ T^{-1}h) = -(f \circ T^{-1}w) = f \circ -T^{-1}w$ y como $T^{-1}h$ es un iso en $\mathscr{C}$ pues h lo es, entonces por el teorema 1,2 (c) se concluye que g es un iso en $\mathscr{C}$.

c) Suponga que g y h son isos en $\mathscr{C}$. Una vez mas se tiene la siguiente configuración inicial:

$$\begin{array}{ccccccc}
X & \xrightarrow{u} & Y & \xrightarrow{v} & Z & \xrightarrow{w} & TX \\
\downarrow{\scriptstyle f} & & \downarrow{\scriptstyle g} & & \downarrow{\scriptstyle h} & & \downarrow{\scriptstyle Tf} \\
A & \xrightarrow{a} & B & \xrightarrow{b} & C & \xrightarrow{c} & TA
\end{array}$$

después de aplicar una rotación a la derecha (por TR2) a los triángulos η y μ, se obtiene la siguiente situación:

$$\begin{array}{ccccccc}
Y & \xrightarrow{v} & Z & \xrightarrow{w} & TX & \xrightarrow{-Tu} & TY \\
\downarrow{\scriptstyle g} & & \downarrow{\scriptstyle h} & & \downarrow{\scriptstyle Tf} & & \downarrow{\scriptstyle Tg} \\
B & \xrightarrow{b} & C & \xrightarrow{c} & TA & \xrightarrow{-Ta} & TB
\end{array}$$

observe que $Tg \circ Tu = Ta \circ Tf$ por lo que $Tg \circ -Tu = -Ta \circ Tf$, dado que g y h son isos, se cuenta con las hipótesis necesarias para concluir que Tf es un iso en $\mathscr{C}$ y como T^{-1} es funtor (es decir preserva isos) se sigue que $f = T^{-1}(Tf)$ es un iso en $\mathscr{C}$.

$\square$

4.

5. Sea $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ una categoría pretriangulada (respectivamente triangulada), pruebe que el triple $(\mathscr{C}^{op}, \tilde{T}, \tilde{\triangle})$ es una categoría pretriangulada (respectivamente triangulada), donde $\tilde{T}(f^{op}) = (T^{-1}(f))^{op}$ y $\tilde{\triangle}$ se define como sigue:

$$X \xrightarrow{u^{op}} Y \xrightarrow{v^{op}} Z \xrightarrow{w^{op}} \tilde{T}X \qquad \in \tilde{\triangle}$$

$$\Longleftrightarrow$$

$$Z \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} X \xrightarrow{Tw} TZ \qquad \in \triangle\,.$$

En tal caso se define $(\mathscr{C}, T, \triangle)^{op} := (\mathscr{C}^{op}, \tilde{T}, \tilde{\triangle})$.
Esto es, $(\mathscr{C}^{op}, \tilde{T}, \tilde{\triangle})$ es una categoría pretriangulada (respectivamente triangulada) opuesta de $(\mathscr{C}, T, \triangle)^{op}$.

Demostración. Se puede observar que al tomar $(\mathscr{C}^{op}, \tilde{T}, \tilde{\triangle})$ como se describe en las hipótesis, al ser $\mathscr{C}$ una categoría abeliana, entonces $\mathscr{C}^{op}$ también es una categoría abeliana, donde la operación está definida por
$f^{op} \tilde{+} g^{op} := (f+g)^{op}$ para cada $f, g \in Mor(\mathscr{C})$ y
$+ : Mor(\mathscr{C}) \times Mor(\mathscr{C}) \to Mor(\mathscr{C})$ la operación definida en $\mathscr{C}$.

Por lo anterior se tiene entonces que el funtor opuesto de una categoría aditiva cualquiera $\mathscr{A}$ es aditivo, pues si $f, g \in \mathrm{Hom}_{\mathscr{A}}(A, B)$ entonces

$$D_{\mathscr{A}}(f+g) = (f+g)^{op} = f^{op} \tilde{+} g^{op} = D_{\mathscr{A}}(f) \tilde{+} D_{\mathscr{A}}(g).$$

Con esto en mente se demostrará que $\tilde{T}$ es un autofuntor aditivo.

Lo primero que se tiene que notar es que $\tilde{T} = D_{\mathscr{C}} T^{-1} D_{\mathscr{C}^{op}}$, por lo que $\tilde{T}$ es un funtor aditivo al ser composición de funtores aditivos. Por otra parte se tiene que $\tilde{G} = D_{\mathscr{C}} T D_{\mathscr{C}^{op}}$ es un funtor aditivo, y es tal que

$$\begin{aligned} \tilde{G}\tilde{T} &= D_{\mathscr{C}} T D_{\mathscr{C}^{op}} D_{\mathscr{C}} T^{-1} D_{\mathscr{C}^{op}} \\ &= D_{\mathscr{C}} T T^{-1} D_{\mathscr{C}^{op}} \\ &= D_{\mathscr{C}} D_{\mathscr{C}^{op}} \\ &= 1_{\mathscr{C}^{op}}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{T}\tilde{G} &= D_{\mathscr{C}} T^{-1} D_{\mathscr{C}^{op}} D_{\mathscr{C}} T D_{\mathscr{C}^{op}} \\ &= D_{\mathscr{C}} T^{-1} T D_{\mathscr{C}^{op}} \\ &= D_{\mathscr{C}} D_{\mathscr{C}^{op}} \\ &= 1_{\mathscr{C}^{op}}. \end{aligned}$$

Por lo tanto $\tilde{T}$ es un autofuntor aditivo.

Vemos ahora que $(\mathscr{C}^{op}, \tilde{T}, \tilde{\triangle})$ es una categoría pretriangulada.

$\boxed{TR1a)}$ Sea $X \in \mathscr{C}^{op}$ entonces $X \in \mathscr{C}$, como $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ es pretriangulada, entonces $X \xrightarrow{1_X} X \longrightarrow 0 \longrightarrow TX \in \triangle$.
Rotando a la izquierda dos veces por (1.3) sobre $\mathscr{C}$ se tiene que
$T^{-1}X \xrightarrow{T^{-1}(0)} 0 \longrightarrow X \xrightarrow{1_X} X \in \tilde{\triangle}$.
Así, por definición de $\tilde{\triangle}$ y por el hecho de que $T^{-1}X = \tilde{T}X$ se tiene que
$X \xrightarrow{(1_X)^{op} = 1_X} X \longrightarrow 0 \longrightarrow \tilde{T}X \in \tilde{\triangle}$.

$\boxed{TR1b)}$ Sean $\alpha: \; C \xrightarrow{w^{op}} B \xrightarrow{v^{op}} A \xrightarrow{u^{op}} \tilde{T}C$ y
$\beta: \; Z \xrightarrow{t^{op}} Y \xrightarrow{s^{op}} X \xrightarrow{r^{op}} \tilde{T}Z$
en $\mathscr{C}^{op}$, tal que $\alpha \in \tilde{\triangle}$ y $\alpha \cong \beta$. Entonces se tienen isomorfismos $\varphi^{op}, \psi^{op}, \theta^{op} \in Mor(\mathscr{C}^{op})$ tales que el siguiente diagrama conmuta en $\mathscr{C}^{op}$:

$$\begin{array}{ll} \alpha : & C \xrightarrow{w^{op}} B \xrightarrow{v^{op}} A \xrightarrow{u^{op}} \tilde{T}C \\ & \downarrow \varphi^{op} \quad \downarrow \psi^{op} \quad \downarrow \theta^{op} \quad \downarrow \tilde{T}(\varphi^{op}) \\ \beta : & Z \xrightarrow[t^{op}]{} Y \xrightarrow[s^{op}]{} X \xrightarrow[r^{op}]{} \tilde{T}Z\,. \end{array}$$

Así el siguiente diagrama conmuta:

$$\begin{tikzcd} \alpha' : & T^{-1}C \arrow[r, "-u"] & A \arrow[r, "v"] & B \arrow[r, "w"] & C \\ \beta' : & T^{-1}Z \arrow[r, "-r"'] \arrow[u, "T^{-1}(\varphi)"] & X \arrow[r, "s"'] \arrow[u, "\theta"] & Y \arrow[r, "t"'] \arrow[u, "\psi"] & Z\,, \arrow[u, "\varphi"] \end{tikzcd}$$

pues

- •) $-u \circ T^{-1}(\varphi) = -[(T^{-1}(\varphi))^{op} \circ u^{op}]^{op} = -[\tilde{T}(\varphi^{op}) \circ u^{op}]^{op}$
  $= -[r^{op}\theta^{op}]^{op} = -[(\theta r)^{op}]^{op} = -[\theta r] = \theta \circ (-r)$.
- •) $v\theta = [\theta^{op}v^{op}]^{op} = [s^{op}\psi^{op}]^{op} = [(\psi s)^{op}]^{op} = \psi s$.
- •) $w\psi = [\psi^{op}w^{op}]^{op} = [t^{op}\varphi^{op}]^{op} = [(\varphi t)^{op}]^{op} = \varphi t$.

Como $A \xrightarrow{v} B \xrightarrow{w} C \xrightarrow{T(u)} TA \in \triangle$ por estar $\alpha \in \tilde{\triangle}$, entonces $\alpha' \in \triangle$ por (TR2) sobre $\mathscr{C}$ al ser su rotación a izquierda. Así se tiene que $\alpha' \cong \beta'$ con $\alpha' \in \triangle$ y, por (TR1 b)), $\beta' \in \triangle$. Eso implica que (al rotar β' por (TR2)) el triangulo $X \xrightarrow{s} Y \xrightarrow{t} Z \xrightarrow{T(r)} TX \in \triangle$ y por definición entonces $\beta \in \tilde{\triangle}$.

$\boxed{TR1c)}$ Sea $f^{op} : B \to A$ en $\mathscr{C}^{op}$ entonces $f : A \to B$ está en $\mathscr{C}$.

Por (TR1 c)) sobre $\mathscr{C}$, existe $B \xrightarrow{\alpha} Z \xrightarrow{\beta} TX$ en $\mathscr{C}$ tal que $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{\alpha} Z \xrightarrow{\beta} TX \in \triangle$, así por (TR2) sobre $\mathscr{C}$ se tiene que

$T^{-1}Z \xrightarrow{-T^{-1}(\beta)} A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{\alpha = T(T^{-1}(\alpha))} Z \in \triangle$ ·

Por lo tanto $B \xrightarrow{f^{op}} A \xrightarrow{-(T^{-1}(\beta))^{op}} T^{-1}Z \xrightarrow{(T^{-1}(\alpha))^{op}} \tilde{T}B \in \tilde{\triangle}$ y así

$B \xrightarrow{f^{op}} A \xrightarrow{-(\tilde{T}(\beta)^{op})} \tilde{T}Z \xrightarrow{\tilde{T}(\alpha)^{op}} \tilde{T}B \in \tilde{\triangle}$ ·

$\boxed{TR2}$ Sea $X \xrightarrow{u^{op}} Y \xrightarrow{v^{op}} Z \xrightarrow{w^{op}} TX \in \tilde{\triangle}$, entonces por definición

$Z \xrightarrow{v} Y \xrightarrow{u} X \xrightarrow{T(w)} TZ \in \triangle$ ·

Por el ejercicio 4 se tiene que $Z \xrightarrow{v} Y \xrightarrow{-u} X \xrightarrow{-T(w)} TZ \in \triangle$, y por (1.3) $T^{-1}X \xrightarrow{-(T^{-1}(-T(w)))} Z \xrightarrow{v} Y \xrightarrow{-u} X \in \triangle$, es decir, $T^{-1}X \xrightarrow{w} Z \xrightarrow{v} Y \xrightarrow{-u} X \in \triangle \cdot$

Entonces por definición de $\tilde{\triangle}$ se tiene que

$$Y \xrightarrow{v^{op}} Z \xrightarrow{w^{op}} T^{-1}X \xrightarrow{-\tilde{T}(u^{op})} \tilde{T}Y \in \tilde{\triangle}$$

es decir, $Y \xrightarrow{v^{op}} Z \xrightarrow{w^{op}} \tilde{T}X \xrightarrow{-\tilde{T}(u^{op})} \tilde{T}Y \in \tilde{\triangle} \cdot$

$\boxed{TR3}$ Sean $\eta^{op} = (X, Y, Z, u^{op}, v^{op}, w^{op})$, $\mu^{op} = (X_0, Y_0, Z_0, u_0^{op}, v_0^{op}, w_0^{op})$ en $\tilde{\triangle}$, y $f^{op} : X \to X_0$, $g^{op} : Y \to Y_0$ tales que $g^{op}u^{op} = u_0^{op}f^{op}$. Entonces se tiene el siguiente diagrama conmutativo en $\mathscr{C}^{op}$:

$$\begin{array}{ll} \eta: & \begin{tikzcd} X \arrow[r, "u^{op}"] \arrow[d, "f^{op}"] & Y \arrow[r, "v^{op}"] \arrow[d, "g^{op}"] & Z \arrow[r, "w^{op}"] & \tilde{T}X \arrow[d, "\tilde{T}(f^{op})"] \\ X_0 \arrow[r, "u_0^{op}"'] & Y_0 \arrow[r, "v_0^{op}"'] & Z_0 \arrow[r, "w_0^{op}"'] & \tilde{T}X_0 . \end{tikzcd} \\ \mu: & \end{array}$$

y en consecuencia se tiene el siguiente diagrama conmutativo en $\mathscr{C}$

$$\begin{tikzcd} Z_0 \arrow[r, "v_0"] & Y_0 \arrow[r, "u_0"] \arrow[d, "g"] & X_0 \arrow[r, "T(w_0)"] \arrow[d, "f"] & TZ_0 & \in \triangle \\ Z \arrow[r, "v"'] & Y \arrow[r, "u"'] & X \arrow[r, "T(w)"'] & TZ & \in \triangle \dots (1) \end{tikzcd}$$

donde, como $g^{op}u^{op} = u_0^{op}f^{op}$ entonces $(ug)^{op} = (fu_0)^{op}$, es decir, $ug = fu_0$.

Rotando a la izquierda por (1.3), se tiene el siguiente diagrama:

$$\begin{tikzcd} Y_0 \arrow[r, "u_0"] \arrow[d, "g"] & X_0 \arrow[r, "T(w_0)"] \arrow[d, "f"] & TZ_0 \arrow[r, "-T(v_0)"] & TY_0 \arrow[d, "T(f)"] \\ Y \arrow[r, "u"'] & X \arrow[r, "T(w)"'] & TZ \arrow[r, "-T(v)"'] & TY. \end{tikzcd}$$

Así por (TR3) sobre $\triangle$, se tiene que existe $h_1 : TZ_0 \to TZ$ tal que hace conmutar el diagrama, es decir, $h_1T(w_0) = t(w)f$ y $-T(v)h_1 = T(f)(-T(v_0))$.

Tomando $h = T^{-1}(h_1)$ se tiene que, como T es fiel y pleno,

$$\begin{aligned} -T(v)h_1 &= -T(gv_0) \\ T(vh) &= T(gv_0) \\ vh &= gv_0 \end{aligned}$$

y

$$h_1 T(w_0) = t(w) f$$
$$T(h) T(w_0) = T(w) f\,.$$

Es decir, (1) con el morfismo h es un diagrama conmutativo, y tomando h^{op} se tiene que $v^{op} g^{op} = (gv)^{op} = (vh)^{op} = h^{op} v^{op}$ y
$w^{op} h^{op} = (hw_0)^{op} = (T{-}1(T(h)T(w_0)))^{op} = (T{-}1(T(h)f))^{op} = (wT^{-1}(f))^{op}$
$= (T^{-1}(f))^{op} w^{op} = \tilde{T}(f^{op}) w^{op}$. Por lo que es diagrama de las hipótesis para TR3 es conmutativo con h^{op}.

$\boxed{TR4}$ Por último, en caso de ser $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ categoría triangulada supongamos que tenemos el siguiente diagrama en $\mathscr{C}^{op}$

$$\begin{tikzcd}
\alpha^{op}: & X \arrow[r, "u^{op}"] \arrow[d, equal] & Y \arrow[r, "i^{op}"] \arrow[d, "v^{op}"] & Z' \arrow[r, "i'^{op}"] & \tilde{T}X \arrow[d, equal] \\
\beta^{op}: & X \arrow[r, "v^{op}u^{op}"] \arrow[d, "u^{op}"'] & Z \arrow[r, "k^{op}"] \arrow[d, equal] & Y' \arrow[r, "k'^{op}"] & \tilde{T}X \arrow[d, "\tilde{T}(u^{op})"] \\
\gamma^{op}: & Y \arrow[r, "v^{op}"] & Z \arrow[r, "r^{op}"] & X' \arrow[r, "j^{op}"] \arrow[d, "h^{op}"] & \tilde{T}Y \arrow[d, "\tilde{T}(i^{op})"] \\
& & & TZ' \arrow[r, equal] & TZ'
\end{tikzcd} \qquad \ldots(1).$$

Se afirma que existen f^{op}, g^{op} tales que $\theta^{op} : Z' \xrightarrow{f^{op}} Y' \xrightarrow{g^{op}} X' \xrightarrow{h^{op}} \tilde{T}Z' \in \tilde{\triangle}$ y hacen conmutar el diagrama anterior.

Observemos el siguiente diagrama en $\mathscr{C}$

$$\begin{tikzcd}
\gamma_0 : & T^{-1}Z \arrow[r, "-T^{-1}(v)"] \arrow[d, equal] & T^{-1}Y \arrow[r, "-j"] \arrow[d, "T^{-1}(u)"] & X' \arrow[r, "r"] & Z \arrow[d, equal] \\
\beta_0 : & T^{-1}Z \arrow[r, "-T^{-1}(uv)"] \arrow[d, "T^{-1}(v)"'] & T^{-1}X \arrow[r, "-k'"] \arrow[d, equal] & Y' \arrow[r, "k"] & Z \arrow[d, "v"] \\
\alpha_0 : & T^{-1}Y \arrow[r, "-T^{-1}(u)"] & T^{-1}X \arrow[r, "-i'"] & Z' \arrow[r, "i"] \arrow[d, "T(h)"] & Y \arrow[d, "T(j)"] \\
 & & & TX' \arrow[r, equal] & TX'
\end{tikzcd} \qquad \ldots (2).$$

Observemos que $h^{op} = \tilde{T}(i^{op})j^{op} = (T^{-1}(i))^{op}j^{op}$ entonces $h = jT^{-1}(i)$ y así $T(h) = T(j)i$.

Ahora, consideremos a α, β y γ como los triangulos distinguidos en $\mathscr{C}$ dados por los triangulos en $\tilde{\triangle}$ dados en el primer diagrama:

$$\alpha : Z' \xrightarrow{i} Y \xrightarrow{u} X \xrightarrow{T(i')} TZ'$$

$$\beta : Y' \xrightarrow{k} Z \xrightarrow{uv} X \xrightarrow{T(k')} TY'$$

$$\gamma : X' \xrightarrow{r} Z \xrightarrow{v} Y \xrightarrow{T(j)} TX' \ ,$$

y rotando dos veces a la izquierda cada uno por (TR2) sobre $\triangle$ se obtienen α_0, β_0 y γ_0 respectivamente, los cuales por definición serán elementos de $\tilde{\triangle}$.

Como $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ es categoría triangulada, por el axioma del octaedro existen $g : X' \to Y'$ y $f : Y' \to Z'$ tales que hacen conmutar el diagrama (2) y $\theta : X' \xrightarrow{g} Y' \xrightarrow{f} Z' \xrightarrow{T(h)} TX' \in \triangle$. Así

$\theta^{op} : Z' \xrightarrow{f^{op}} Y' \xrightarrow{g^{op}} X' \xrightarrow{h^{op}} TZ' \in \tilde{\triangle}$, y f^{op}, g^{op} hacen conmutar el diagrama (1), pues:

- $f^{op}i^{op} = (if)^{op} = (vk)^{op} = k^{op}v^{op}$.
- $-i' = f \circ (-k')$ entonces $(-i')^{op} = (f \circ (-k'))^{op} = -(k')^{op}f^{op}$ así $i^{op} = k'^{op}f^{op}$.
- $g^{op}k^{op} = (kg)^{op} = (r)^{op}$.
- $j^{op}g^{op} = (gj)^{op} = (kT^{-1}(u))^{op} = (T^{-1}(u))^{op}k^{op} = \tilde{T}(u^{op})k^{op}$.

$\square$

6. Sean $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ una categoría pre-triangulada y $\eta : X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX$ en $\triangle$. Pruebe que para cada $i \in \mathbb{Z}$, el siguiente triangulo es distinguido

$$\eta^i : T^i(X) \xrightarrow{(-1)^i T^i(u)} T^i(Y) \xrightarrow{(-1)^i T^i(v)} T^i(Z) \xrightarrow{(-1)^i T^i(w)} T^{i+1}(X).$$

Demostración. En el caso que $i \in \mathbb{N}$ la demostración se sigue por inducción.

Caso base. $i = 0$. En este caso $\eta^i = \eta^0 = \eta \in \triangle$.

Hipótesis de inducción. Sea $i > 0$ y suponga que $\eta^i \in \triangle$.

Paso inductivo. Después de aplicar 3 rotaciones consecutivas a la derecha (TR2) al triángulo η^i se obtiene el siguiente triangulo distinguido:

$$T^{i+1}(X) \xrightarrow{(-1)^{i+1}T^{i+1}u} T^{i+1}(Y) \xrightarrow{(-1)^{i+1}T^{i+1}v} T^{i+1}(Z) \xrightarrow{(-1)^{i+1}T^{i+1}w} T^{i+2}(X)$$

es decir, $\eta^{i+1} \in \triangle$.

Resta demostrar que se encuentran los triángulos del tipo $\eta^{(-i)}$ para $i \geq 0$. Y para demostrar esto se procede también por inducción sobre i. El caso base coincide con el demostrado antes, se sigue pues con:

hipótesis de inducción. Sea $i > 0$ y suponga que $\eta^{(-i)} \in \triangle$.

Paso inductivo. Después de aplicar 3 rotaciones consecutivas a la izquierda (por 1.3) al triangulo $\eta^{(-i)}$ se obtiene el siguiente triangulo distinguido:

$$T^{-(i+1)}(X) \xrightarrow{(-1)^{-(i+1)}T^{-(i+1)}u} T^{-(i+1)}(Y) \xrightarrow{(-1)^{-(i+1)}T^{-(i+1)}v} T^{-(i+1)}(Z) \xrightarrow{(-1)^{-(i+1)}T^{-(i+1)}w} T^{-i}(X)$$

es decir, $\eta^{-(i+1)} \in \triangle$. Se concluye el ejercicio. $\square$

7.

8. Sean $\mathscr{C}$ una categoría y $h : A \to B$ en $\mathscr{C}$. Pruebe que:

$$\mathrm{Hom}_{\mathscr{C}}(\bullet, h) : \mathrm{Hom}_{\mathscr{C}}(\bullet, A) \xrightarrow{\sim} \mathrm{Hom}_{\mathscr{C}}(\bullet, B) \iff h : A \xrightarrow{\sim} B.$$

Demostración. Supongamos $h : A \to B$ es isomorfismo y sea $M \in \mathscr{C}$, entonces $\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,h) : \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,A) \longrightarrow \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,B)$ ·
Sean $g : B \to A$ tal que $h \circ g = 1_B, g \circ h = 1_A$ y $r \in \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,A)$ entonces $\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,h)(r) = h \circ r$, así $\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(\bullet,g) : \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(\bullet,B) \longrightarrow \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(\bullet,A)$ es tal que

$$\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,g) \circ \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,h)(r) = g(hr) = (gh)r = r$$

así $\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,g) \circ \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,h) = 1_A$.

Análogamente si $s \in \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,B)$ entonces
$\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,h) \circ \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,g)(s) = h(gs) = (hg)s = s$, es decir
$\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,h) \circ \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,g) = 1_B$ y así $\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(M,h)$ es iso.

Por otra parte, si $\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(\bullet,h)$ es isomorfismo, entonces el siguiente diagrama conmuta

$$\begin{tikzcd}
\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,A) \arrow[r, "\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,h)", "\sim"'] \arrow[d, "\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(1_A,A)"'] & \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,B) \arrow[d, "\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(1_A,B)"] \\
\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,A) \arrow[r, "\sim", "\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,h)"'] & \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,B).
\end{tikzcd}$$

mas aún, como $\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,h)(1_A) = h \circ 1_A = h \in \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,B)$ entonces $\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}^{-1}(A,h)h = 1_A$.

Ahora, por el lema de Yoneda existe $g : B \to A$ tal que
$\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}^{-1}(A,h) = \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,g)$ en particular
$h \circ g = \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}^{-1}(A,h)(g) = \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,h)\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}^{-1}(A,h)(1_B) = 1_B$ y
$g \circ h = \operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}^{-1}(A,h)\operatorname{Hom}_{\mathscr{C}}(A,h)(1_A) = 1_A$ por lo que h es isomorfismo.

□

9. Sean $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ una categoría pre-triangulada y $\eta : X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX$
$\eta' : A \xrightarrow{a} B \xrightarrow{b} C \xrightarrow{c} TA \in \triangle$. Pruebe que el diagrama en $\mathscr{C}$,

$$\begin{tikzcd}
X \arrow[r, "u"] & Y \arrow[r, "v"] \arrow[d, "g"] & Z \arrow[r, "w"] & T(X) \\
A \arrow[r, "a"] & B \arrow[r, "b"] & C \arrow[r, "c"] & T(A)
\end{tikzcd}$$

las siguientes condiciones son equivalentes.

a) $bgu = 0$
b) Existe $f : X \to A$ en $\mathscr{C}$ tal que $gu = af$

c) Existe $h : Z \to C$ en $\mathscr{C}$ tal que $bg = hv$

d) Existen $f : X \to A$ y $h : Z \to C$ en $\mathscr{C}$ tales que $(f, g, h) : \eta \to \eta^{'}$ es un morfismo de triángulos.

Mas aún, si $Hom_{\mathscr{C}}(X, T^{-1}C) = 0$ y las condiciones anteriores se satisfacen entonces el morfismo f en b) (resp. h en c)) es único.

Demostración. *a*) $\Rightarrow$ *b*). Suponga que $b(gu) = bgu = 0$, lo anterior implica que existe $f : X \to A$ tal que $af = gu$ pues $a \in sker(b)$.

b) $\Rightarrow$ *c*). Suponga que existe $f : X \to A$ en $\mathscr{C}$ tal que $gu = af$, por TR3 existe $h : Z \to C$ tal que $(f, g, h) : \eta \to \eta^{'}$ es un morfismo de triángulos, en particular $bg = hv$.

c) $\Rightarrow$ *d*). Suponga que existe $h : Z \to C$ en $\mathscr{C}$ tal que $bg = hv$. Resta estudiar la existencia de algún $f : X \to A$ tal que $gu = af$ y que $T(f)w = ch$. Se inicia con la siguiente configuración:

$$\begin{tikzcd}
X \arrow[r, "u"] & Y \arrow[r, "v"] \arrow[d, "g"] & Z \arrow[r, "w"] \arrow[d, "h"] & T(X) \\
A \arrow[r, "a"] & B \arrow[r, "b"] & C \arrow[r, "c"] & T(A)
\end{tikzcd}$$

después de aplicar una vez TR2 a los triángulos η y $\eta^{'}$ se obtiene la siguiente situación:

$$\begin{tikzcd}
Y \arrow[r, "v"] \arrow[d, "g"] & Z \arrow[r, "w"] \arrow[d, "h"] & T(X) \arrow[r, "-Tu"] & T(Y) \arrow[d, "Tg"] \\
B \arrow[r, "b"] & C \arrow[r, "c"] & T(A) \arrow[r, "-Ta"] & T(B)
\end{tikzcd}$$

entonces por TR3 y por que T es un automorfismo, existe $f : X \to A$ tal que $T(f) \circ w = c \circ h$ y $T(g) \circ -Tu = -Ta \circ Tf$ por consiguiente $gu = af$. Se puede concluir que $(f, g, h) : \eta \to \eta^{'}$ es un morfismo de triángulos.

d) $\Rightarrow$ *a*). Por hipótesis se sabe que $hv = bg$, es así que se cumple lo siguiente:

$$\begin{aligned}
bgu =&(bg)u \\
=&(hv)u \\
=&h(vu) \\
=&h0 \\
=&0
\end{aligned}$$

A continuación se estudia la unicidad del morfismo $f : X \to A$. Suponga que existe otro morfismo $f' : X \to A$ en $\mathscr{C}$ tal que $gu = af'$. Es así que se tiene la siguiente situación:

$$\begin{tikzcd} X \arrow[r, "u"] \arrow[d, dashed, shift right, "f'"'] \arrow[d, shift left, "f"] & Y \arrow[r, "v"] \arrow[d, "g"] & Z \arrow[r, "w"] & T(X) \\ A \arrow[r, "a"] & B \arrow[r, "b"] & C \arrow[r, "c"] & T(A) \end{tikzcd}$$

después de rotar ambos triángulos una vez a la izquierda (por 1.3) y aplicar el funtor cohomológico $Hom_{\mathscr{C}}(X, \_) : \mathscr{C} \to ab$ se tiene el siguiente par de sucesiones exactas:

$$\begin{tikzcd} Hom_{\mathscr{C}}(X, T^{-1}Z) \arrow[r] \arrow[d] & Hom_{\mathscr{C}}(X, X) \arrow[r, "Hom_{\mathscr{C}}(X,u)"] \arrow[d, dashed, shift right, "Hom_{\mathscr{C}}(X,f')"'] \arrow[d, shift left, "Hom_{\mathscr{C}}(X,f)"] & Hom_{\mathscr{C}}(X, Y) \arrow[d, "Hom_{\mathscr{C}}(X,g)"] \\ Hom_{\mathscr{C}}(X, T^{-1}C) = 0 \arrow[r] & Hom_{\mathscr{C}}(X, A) \arrow[r, "Hom_{\mathscr{C}}(X,a)"'] & Hom_{\mathscr{C}}(X, B) \end{tikzcd}$$

se puede deducir que $Hom_{\mathscr{C}}(X, a)$ es un monomorfismo, así pues se cumple lo siguiente:

$$\begin{aligned} (Hom_{\mathscr{C}}(X, a) \circ Hom_{\mathscr{C}}(X, f))(1_X) =& (Hom_{\mathscr{C}}(X, a) \circ Hom_{\mathscr{C}}(X, f'))(1_X) \\ Hom_{\mathscr{C}}(X, f)(1_X) =& Hom_{\mathscr{C}}(X, f')(1_X) \\ f =& f' \end{aligned}$$

como se buscaba.

Para finalizar se estudia la unicidad del morfismo $h : Z \to C$. Suponga que existe otro morfismo $h' : Z \to C$ en $\mathcal{C}$ tal que $bg = h'v$. Así pues se tiene la siguiente situación

$$\begin{tikzcd} X \arrow[r, "u"] \arrow[d, "f"] & Y \arrow[r, "v"] \arrow[d, "g"] & Z \arrow[r, "w"] \arrow[d, dashed, shift right, "h'"'] \arrow[d, shift left, "h"] & T(X) \\ A \arrow[r, "a"] & B \arrow[r, "b"] & C \arrow[r, "c"] & T(A) \end{tikzcd}$$

después de rotar ambos triangulos a las izquierda dos veces (por 1.3) y aplicar el funtor contravariante $Hom_{\mathcal{C}}(\_, T^{-1}C) : \mathcal{C} \to Ab$ se tiene el siguiente par de sucesiones exactas:

$$\begin{tikzcd}
Hom_{\mathscr{C}}(X,T^{-1}C)=0 \arrow[r] & Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}Z,T^{-1}C) \arrow[r, "Hom_{\mathscr{C}}(-T^{-1}v,T^{-1}C)"] & Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}Y,T^{-1}C) \\
Hom_{\mathscr{C}}(A,T^{-1}C) \arrow[r] \arrow[u] & Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}C,T^{-1}C) \arrow[r, "Hom_{\mathscr{C}}(-T^{-1}b,T^{-1}C)"'] \arrow[u, shift right, "Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}h,T^{-1}C)"] \arrow[u, shift left, dashed, "Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}h',T^{-1}C)"'] & Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}B,T^{-1}C) \arrow[u]
\end{tikzcd}$$

se puede deducir que $Hom_{\mathscr{C}}(-T^{-1}v, T^{-1}C)$ es un monomorfismo, así pues se deduce lo siguiente:

$$\begin{aligned}
([-T^{-1}v, T^{-1}C] \circ Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}h, T^{-1}C))(1_{T^{-1}C}) =& ([-T^{-1}v, T^{-1}C] \circ Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}h', T^{-1}C))(1_{T^{-1}C}) \\
Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}h, T^{-1}C))(1_{T^{-1}C})(1_{T^{-1}C}) =& Hom_{\mathscr{C}}(T^{-1}h', T^{-1}C))(1_{T^{-1}C})(1_{T^{-1}C}) \\
T^{-1}h =& T^{-1}h' \\
h =& h'
\end{aligned}$$

donde $[-T^{-1}v, T^{-1}C] = Hom_{\mathscr{C}}(-T^{-1}v, T^{-1}C)$.

□

10.

11. Sean $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ una categoría triangulada y $\mathscr{D}$ una subcategoría triangulada. Pruebe que:

   a) $\mathscr{D}$ es cerrada por isomorfismos en $\mathscr{C}$ (en particular, $\mathscr{D}$ contiene a todos los ceros de $\mathscr{C}$).

   b) $\mathscr{D}$ es una subcategoría aditiva de $\mathscr{C}$.

   c) $\forall \eta :$ $\begin{tikzcd} & Z \arrow[dl] & \\ X \arrow[rr] & & Y \arrow[ul] \end{tikzcd}$ $\in \triangle$, con X, Y en $\mathscr{D}$, se tiene que $Z \in \mathscr{D}$.

   d) Si $X \to Y \to Z \to TX \in \triangle$ y dos de los objetos X, Y, Z están en $\mathscr{D}$, entonces el tercero de ellos también lo está.

   e) Sea $\triangle|_{\mathscr{D}} := \{X \to Y \to Z \to TX \in \triangle : X, Y, Z \in \mathscr{D}\}$ y la restricción $T|_{\mathscr{D}}$ del funtor $T : \mathscr{C} \to \mathscr{C}$ en la subcategoría $\mathscr{D}$. Entonces el triple $(\mathscr{D}, T|_{\mathscr{D}}, \triangle|_{\mathscr{D}})$ es una categoría triangulada.

   g) $\mathscr{D}^{op}$ es una subcategoría triangulada de $(\mathscr{C}, T, \triangle)^{op}$.

Demostración. $\boxed{a)}$ Sean $X, 0 \in Obj(\mathscr{D})$ tal que $X \cong Y$ en $\mathscr{C}$ (por definición de subcategoría triangulada existe un 0 en $\mathscr{D}$).

Observemos primero que

$$X \xrightarrow[\sim]{\binom{1_X}{0}} X\coprod 0$$

y que los siguientes son morfismos en $\mathscr{C}$: $(h\ 0) : X\coprod 0 \to Y$ y $\begin{pmatrix} h^{-1} \\ 0 \end{pmatrix}$: $Y \to X\coprod 0$. En particular

$$(h\ 0)\begin{pmatrix} h^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} = hh^{-1} + 0 = 1_Y \qquad \text{y}$$

$$\begin{pmatrix} h^{-1} \\ 0 \end{pmatrix}(h\ 0) = \begin{pmatrix} h^{-1}h \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1_X \\ 0 \end{pmatrix} = 1_{x\coprod 0}\,.$$

Mas aún, si consideramos a Y con la familia $\{\nu_1 = h, \nu_2 = 0_{0Y}\}$ se tiene que $(h\ 0)$ es un isomorfismo que conmuta con las inclusiones naturales del coproducto $X\coprod 0$:

$$(h\ 0)\begin{pmatrix} 1_X \\ 0 \end{pmatrix} = h + 0 = h = \nu_1 \quad \text{y}$$

$$(h\ 0)\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 0 + 0 = 0 = \nu_2.$$

Por lo tanto Y con la familia $\{\nu_1\,,\, \nu_2\}$ son un coproducto de $\{X, 0\}$ y como $\mathscr{D}$ es una subcategoría triangulada, entonces por $(ST2)$ se tiene que $Y \in Obj(\mathscr{D})$.

$\boxed{b)}$ Por definición de subcategoría triangulada $\mathscr{D}$ tiene objeto cero (SA1). Como $\mathscr{C}$ es aditiva y $\mathscr{D}$ es plena, $\mathrm{Hom}_{\mathscr{D}}$ tiene estructura de grupo abeliano para todo $A, B \in Obj(\mathscr{C})$ (SA2).

Como $\mathscr{C}$ es aditiva y $\mathscr{D}$ es plena la composición de morfismos en $\mathscr{D}$ es bilineal (SA3), además, por definición $\mathscr{D}$ es cerrada bajo coproductos finitos (SA4), asi $\mathscr{D}$ es subcategoría aditiva de $\mathscr{C}$.

$\boxed{c)}$ Sea $\eta :\ X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX\ \in \triangle$ con $X, Y \in \mathscr{D}$, entonces por (TR2) $Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX \xrightarrow{-T(u)} TY\ \in \triangle$, como $T(\mathscr{D}) \subseteq \mathscr{D}$, se tiene que $TX \in \mathscr{D}$ y por (TR1a)

$$Y \xrightarrow{1_Y} Y \longrightarrow 0 \longrightarrow TY \quad \text{y}$$

$$0 \longrightarrow TX \xrightarrow{T(1_X)} TX \longrightarrow 0$$

están en $\triangle$.

Pero $\mathscr{D}$ es cerrado bajo coproductos finitos, así

$$Y \xrightarrow{\binom{1}{0}} Y \coprod TX \xrightarrow{(0\ 1)} TX \xrightarrow{-T(u)} TY \quad \in \triangle.$$

Así se tiene el siguiente diagrama conmutativo:

$$\begin{tikzcd}
Y \arrow[r, "\binom{1}{0}"] \arrow[d, "1_Y"] & Y \coprod TX \arrow[r, "(0\ 1)"] & TX \arrow[r, "-T(u)"] \arrow[d, "T(1_X)"] & TY \arrow[d, "T(1_Y)"] \\
Y \arrow[r, "v"] & Z \arrow[r, "w"] & TX \arrow[r, "-T(u)"] & T(Y)
\end{tikzcd}$$

por el lema (1.1) existe un morfismo $g : Y \coprod TX \longrightarrow Z$ tal que $\varphi := (1_Y, g, T(1_X)) \in J(\mathscr{C}, \triangle)$, además por (Ejercicio 3) se tiene que g es iso, por lo tanto φ es iso y por el inciso b) se tiene que $Z \in \mathscr{D}$.

$\boxed{d)}$ Sea $X \to Y \to Z \to TX \in \triangle$ tal que dos de los objetos X, Y, Z están en $\mathscr{D}$, si $X, Y \in \mathscr{D}$ entonces el inciso c) implica que $Z \in \mathscr{D}$. Ahora (S.P.G) supongamos $X, Z \in \mathscr{D}$ rotamos a la izquierda por el teorema (1.3) y tenemos que $T^{-1}(Z) \to X \to Y \to Z \in \triangle$. Pero $T^{-1}(\mathscr{D}) \subseteq \mathscr{D}$, por lo que $T^{-1}(Z) \in \mathscr{D}$. Y así, por el inciso c) se tiene el resultado (el último caso es análogo rotando dos veces a la izquierda).

$\boxed{e)}$ Sean $\triangle|_{\mathscr{D}} := \{X \to Y \to Z \to TX \in \triangle \mid X, Y, Z \in \mathscr{D}\}$ y la restricción $T|_{\mathscr{D}}$ del funtor $T : \mathscr{C} \longrightarrow \mathscr{C}$ en la subcategoría $\mathscr{D}$.

Se probará que $(\mathscr{D}, T|_{\mathscr{D}}, \triangle|_{\mathscr{D}})$ es una categoría triangulada (probando cada uno de los axiomas).

$\boxed{TR1.a}$

Sea $X \in \mathscr{D}$, en particular $X \in \mathscr{C}$ por lo que, por (TR1.a) sobre $\mathscr{C}$ $X \xrightarrow{1_X} X \longrightarrow 0 \longrightarrow TX \quad \in \triangle$. Pero por el inciso a) sabemos que todos los ceros de $\mathscr{C}$ están en $\mathscr{D}$, y como $TX \in \mathscr{D}$ entonces

$X \xrightarrow{1_X} X \longrightarrow 0 \longrightarrow TX \quad \in \triangle|_{\mathscr{D}}$

$\boxed{TR1.b}$
Por el inciso a) se tiene el resultado.

$\boxed{TR1.c}$
Sea $f : X \to Y$ en $\mathscr{D}$, entonces $f : X \to Y \in \mathscr{C}$ y por (TR1.c) en $\mathscr{C}$ existe $Y \xrightarrow{\alpha} Z \xrightarrow{\beta} TX \ \in \mathscr{C}$ tal que
$X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{\alpha} Z \xrightarrow{\beta} TX \ \in \triangle$. Por el inciso c), como $X, Y \in \mathscr{D}$ entonces $Z \in \mathscr{D}$ y como $\mathscr{D}$ es plena se tiene que
$X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{\alpha} Z \xrightarrow{\beta} TX \ \in \triangle|_{\mathscr{D}}$.

$\boxed{TR2}$
Supongamos $X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX \ \in \triangle|_{\mathscr{D}} \subseteq \triangle$ entonces
$Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX \xrightarrow{-T(u)} TY \ \in \triangle$ pero $T(\mathscr{D}) \subset \mathscr{D}$ y T es pleno por lo que $Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX \xrightarrow{-T(u)} TY \ \in \triangle|_{\mathscr{D}}$.

$\boxed{TR3}$
Sean $\eta = (X, Y, Z, u, v, w)$, $\mu = (X', Y', Z', u', v', w')$ en $\triangle|_{\mathscr{D}}$ y
$f : X \to X',\ g : Y \to Y'$ en $\mathscr{D}$ tales que $gu = u'f$.
Por (TR3) sobre $\mathscr{C}$ existe $h : Z \to Z'$ tal que $\varphi := (f, g, h) : \eta \to \mu$ es morfismo en $\mathscr{T}(\mathscr{C}, T)$ en particular como $Z, Z' \in \mathscr{D}$ y $\mathscr{D}$ es plena, entonces $h \in \hom_{\mathscr{D}}(Z, Z')$, por lo tanto $\varphi \in \mathscr{T}(\mathscr{D}, T)$.

$\boxed{TR4}$ (Axioma del octaedro)
Supongamos que tenemos el siguiente diagrama en $\mathscr{D}$:

$$\begin{tikzcd}
X \arrow[r, "u"] \arrow[d, equal] & Y \arrow[r, "i"] \arrow[d, "v"] & Z' \arrow[r, "i'"] & TX \arrow[d, equal] & \in \triangle|_{\mathscr{D}} \\
X \arrow[r, "vu"] \arrow[d, "u"] & Z \arrow[r, "k"] \arrow[d, equal] & Y' \arrow[r, "k'"] & TX \arrow[d, "T(u)"] & \in \triangle|_{\mathscr{D}} \\
Y \arrow[r, "v"] & Z \arrow[r, "r"] & X' \arrow[r, "j"] \arrow[d, "T(i)j"] & TY \arrow[d, "T(i)"] & \in \triangle|_{\mathscr{D}} \\
& & TZ' \arrow[r, equal] & TZ' . &
\end{tikzcd}$$

El axioma del octaedro en $\mathscr{C}$ nos indica que existe $f : Z' \to Y'$ y $g : Y' \to X'$ tales que hacen conmutar el diagrama anterior, y que
$\theta : Z' \xrightarrow{f} Y' \xrightarrow{g} Z' \xrightarrow{h} TZ' \ \in \triangle$. Como $\mathscr{D}$ es pleno y cada ob-

jeto (vertice) del diagrama está en $\mathscr{D}$ entonces $f, g \in Mor(\mathscr{D})$ por lo que $\theta \in \triangle|_{\mathscr{D}}$ y se cumple el axioma del octaedro.

$\boxed{f)}$ Por alguna extraña razón no hay f en este ejercicio.

$\boxed{g)}$ Para comenzar se observa que, como $\mathscr{D}$ es una categoría triangulada, entonces por el (Ej. 5) $\mathscr{D}^{op}$ será una categoría triangulada. También se tiene que $Obj(\mathscr{D}) = Obj(\mathscr{D}^{op})$ y como $\mathscr{D}$ es subcategoría plena de $\mathscr{C}$ entonces $\mathscr{D}^{op}$ es subcategoría plena de $\mathscr{C}^{op}$. Esto último es facil de ver, pues cada morfismo en $\mathscr{C}^{op}$ entre objetos de $\mathscr{D}^{op}$ es el morfismo opuesto f^{op} de un morfismo f en $\mathscr{C}$ entre objetos de $\mathscr{D}$, y como $\mathscr{D}$ es plena, entonces f está en $\mathscr{D}$ y así f^{op} está en $\mathscr{D}^{op}$.

Se probarán los axiomas de subcategoría triangulada para $(\mathscr{D}, T|_{\mathscr{D}}, \triangle|_{\mathscr{D}})$.

$\boxed{ST1}$ Como $\mathscr{D}$ contiene un objeto cero, entonces $\mathscr{D}^{op}$ contiene un objeto cero.

$\boxed{ST2}$ Sean $X, Y \in \mathscr{D}^{op}$, entonces $X, Y \in \mathscr{D}$ y por ser $\mathscr{D}$ subcategoría triangulada, entonces $X \coprod Y$ está en $\mathscr{D}$. Pero $\mathscr{C}$ es una categoría aditiva, entonces $\mathscr{D}$ es aditiva también y todo coproducto finito es un producto finito, así $X \prod Y \in \mathscr{D}$ y por lo tanto $(X \coprod^{op} Y) = (X \prod Y)^{op} \in \mathscr{D}^{op}$ donde $\coprod^{op}$ denota al coproducto en $\mathscr{D}$.

$\boxed{ST3}$ Observemos que $A \in Obj(\mathscr{D}^{op}) \iff A \in Obj(\mathscr{D})$, entonces para cada $A \in \mathscr{D}$, $T(A) \in \mathscr{D}$ y $\tilde{T}(A) \in \mathscr{D}^{op}$. Análogamente $T^{-1}(A) \in \mathscr{D}^{op}$.

Sea $f : A \to B$ en $\mathscr{D}^{op}$ entonces $\tilde{T}(f) = (T^{-1}(f^{op}))^{op}$ pero $f^{op} : B \to A$ está en $\mathscr{D}$ por lo que $T^{-1}(f^{op}) \in \mathscr{D}$, es decir, $\tilde{T}(f) \in (\mathscr{D})^{op}$. Análogamente $\tilde{T}^{-1}(f) \in (\mathscr{D})^{op}$.

$\boxed{ST4}$ Sea $f : X \to Y$ en $\mathscr{D}^{op}$, ntonces $f^{op} : Y \to X$ en $\mathscr{D}$, por (ST4) sobre $\mathscr{D}$, se tiene que existe $\eta :\ Y \xrightarrow{f^{op}} X \longrightarrow Z \longrightarrow TY\ \in \triangle|_{\mathscr{D}}$ con Z en $\mathscr{D}$. Así por el teorema (1.3) $\eta_0 :\ T^{-1}Z \longrightarrow Y \xrightarrow{f^{op}} X \longrightarrow Z\ \in \triangle|_{\mathscr{D}}$, y por definición de categoría triangulada opuesta

$$X \xrightarrow{f} Y \longrightarrow \tilde{T}^{-1}Z \longrightarrow \tilde{T}X\ \in \triangle|_{\mathscr{D}^{op}}\ .$$

Por lo que $(\mathscr{D}, T|_{\mathscr{D}}, \triangle|_{\mathscr{D}})^{op}$ es subcategoría triangulada de $(\mathscr{C}, T, \triangle)^{op}$.

$\square$

12. Sea $(F,\eta) : (\mathscr{C}_1, T_1, \triangle_1) \to (\mathscr{C}_2, T_2, \triangle_2)$ un funtor graduado entre categorías trianguladas. Para cada $\theta : X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX \in T(\mathscr{C}_1, T_1)$ defina $\bar{F}(\theta) : FXu \xrightarrow{F} FYv \xrightarrow{F} FZw \xrightarrow{F} T_2FX \in T(\mathscr{C}_2, T_2)$.

Pruebe que la correspondencia que extiende al funtor F a la categoría de triángulos $\bar{F} : \mathcal{T}(\mathscr{C}_1, T_1) \to \mathcal{T}(\mathscr{C}_2, T_2)$

$$((f,g,h) : \theta \to \mu) \longmapsto (\bar{F}(f,g,h) : \bar{F}(\theta) \to \bar{F}(\mu))$$

donde $\bar{F}(f,g,h) = (Ff, Fg, Fh)$, es funtorial.

Demostración. a) Sea $\varphi = (f,g,h) : \theta \to \mu$ un morfismo en $\mathcal{T}(\mathscr{C}_1, T_1)$, se demuestra que en efecto $\bar{F}(\varphi) : \bar{F}(\theta) \to \bar{F}(\mu)$ es un morfismo en $\mathcal{T}(\mathscr{C}_2, T_2)$. A continuación se ilustra al morfismo $\varphi : \theta \to \mu$:

$$\begin{tikzcd} X \arrow[r, "u"] \arrow[d, "f"] & Y \arrow[r, "v"] \arrow[d, "g"] & Z \arrow[r, "w"] \arrow[d, "h"] & T_1X \arrow[d, "T_1f"] \\ A \arrow[r, "a"] & B \arrow[r, "b"] & C \arrow[r, "c"] & T_1A \end{tikzcd}$$

se busca demostrar que el siguiente diagrama conmuta:

$$\begin{tikzcd} FX \arrow[r, "Fu"] \arrow[d, "Ff"] & FY \arrow[r, "Fv"] \arrow[d, "Fg"] & FZ \arrow[r, "\eta_X \circ Fw"] \arrow[d, "Fh"] & T_2FX \arrow[d, "T_1f"] \\ FA \arrow[r, "Fa"] & FB \arrow[r, "Fb"] & FC \arrow[r, "\eta_A \circ Fc"] & T_2FA \end{tikzcd}$$

observe que debido a la funtorialidad de F se tiene la conmutatividad de los primeros dos cuadros, resta verificar la del último.

Como $\eta : FT_1 \to T_2F$ es un isomorfismo natural, se tiene que el siguiente diagrama conmuta:

$$\begin{tikzcd} FZ \arrow[r, "Fw"] \arrow[d, "Fh"] & FT_1X \arrow[r, "\eta_X"] \arrow[d, "FT_1f"] & T_2FX \arrow[d, "T_2Ff"] \\ FC \arrow[r, "Fc"] & FT_1A \arrow[r, "\eta_A"] & T_2FA \end{tikzcd}$$

así pues se puede concluir que $\bar{F}(\varphi) : \bar{F}(\theta) \to \bar{F}(\mu)$ es un morfismo en $\mathcal{T}(\mathscr{C}_2, T_2)$.

En lo que respecta a la composición se cumple lo siguiente. Sean $\varphi = (f,g,h) : \theta \to \mu$, $\psi = (r,s,t) : \mu \to \sigma$ morfismos en $\mathcal{T}(\mathscr{C}_1, T_1)$. Así

$$\begin{aligned}
\bar{F}(\psi \circ \varphi) =& \bar{F}((r,s,t)\circ(f,g,h))\\
=& \bar{F}(rf, sg, th)\\
=& (F(rf), F(sg), F(th))\\
=& (Fr\circ Ff, Fs\circ Fg, Ft\circ Fh)\\
=& (Fr, Fs, Ft)\circ(Ff, Fg, Fh)\\
=& \bar{F}(r,s,t)\circ\bar{F}(f,g,h)
\end{aligned}$$

Además para cualquier $\theta :\ X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} TX \ \in \mathcal{T}(\mathscr{C}_1, T_1)$ se cumple que:

$$\begin{aligned}
\bar{F}(1_\theta) =& \bar{F}(1_X, 1_Y, 1_Z)\\
=& (F(1_X), F(1_Y), F(1_Z))\\
=& (1_{FX}, 1_{FY}, 1_{FZ})\\
=& 1_{\bar{F}(\theta)}.
\end{aligned}$$

Se puede concluir que $\bar{F} : \mathcal{T}(\mathscr{C}_1, T_1) \to \mathcal{T}(\mathscr{C}_2, T_2)$ es un funtor.

□

13.

Sección extra

13' Sean $\mathscr{C}$ una categoría y $\Sigma \subset Mor(\mathscr{C})$. Pruebe que la categoría $\mathscr{C}[\Sigma^{-1}]$ y el funtor de localización $Q : \mathscr{C} \to \mathscr{C}(\Sigma^{-1}]$ son únicos salvo isomorfismos. Mas precisamente, sea $q : \mathscr{C} \to \mathscr{B}$ un funtor tal que

a) $\forall \sigma \in \Sigma \quad q(\sigma)$ es iso.

b) $\forall f : \mathscr{C} \to \mathscr{A}$ tal que $F(\sigma)$ es iso $\forall \sigma \in \Sigma$, $\exists! \bar{F} : \mathscr{B} \to \mathscr{A}$ tal que $\bar{F} \circ q = F$.

Pruebe que existe un isomorfismo de categorías $\epsilon : \mathscr{C}[\Sigma^{-1}] \to \mathscr{B}$ tal que $\epsilon \circ Q = q \quad$ i.e.

$$\begin{tikzcd}
\mathscr{C} \arrow[r, "Q"] \arrow[dr, "q"'] & \mathscr{C}[\Sigma^{-1}] \arrow[d, dashed, "\epsilon"] \\
& \mathscr{B}
\end{tikzcd}.$$

Demostración. Supongamos $q : \mathscr{C} \to \mathscr{B}$ es un funtor tal que

a) $\forall \sigma \in \Sigma \quad q(\sigma)$ es iso.

b) $\forall f : \mathscr{C} \to \mathscr{A}$ tal que $F(\sigma)$ es iso $\forall \sigma \in \Sigma$, $\exists! \bar{F} : \mathscr{B} \to \mathscr{A}$ tal que $\bar{F} \circ q = F$.

Como $Q : \mathscr{C} \to \mathscr{C}[\Sigma^{-1}]$ es tal que $Q(\sigma)$ es iso $\forall \sigma \in \Sigma$, entonces por hipótesis $\exists!\, \epsilon_0 : \mathscr{B} \to \mathscr{C}[\Sigma^{-1}]$ tal que $\epsilon_0 \circ q = Q$, es decir, el siguiente diagrama conmuta:

$$\begin{tikzcd} \mathscr{C} \arrow[r, "q"] \arrow[dr, "Q"'] & \mathscr{B} \arrow[d, dashed, "\epsilon_0"] \\ & \mathscr{C}[\Sigma^{-1}] \end{tikzcd} .$$

Ahora, como Q es funtor de localización y $q(\sigma)$ es iso $\forall \sigma \in \Sigma$, entonces por definición $\exists!\, \epsilon : \mathscr{C}[\Sigma^{-1}] \to \mathscr{B}$ tal que $\epsilon \circ Q = q$. Así se tiene el siguiente diagrama:

$$\begin{tikzcd} & \mathscr{C}[\Sigma^{-1}] \arrow[d, "\epsilon"] \\ \mathscr{C} \arrow[ur, "Q"] \arrow[r, "q"] \arrow[dr, "Q"'] & \mathscr{B} \arrow[d, dashed, "\epsilon_0"] \\ & \mathscr{C}[\Sigma^{-1}] \end{tikzcd} .$$

En particular $\epsilon_0\epsilon$ es un funtor, t es tal que $\forall \sigma \in \Sigma$ $\epsilon_0\epsilon(\sigma)$ es un isomorfismo. Así por (L2) sobre el funtor de localización Q, se tiene que $\epsilon_0\epsilon$ es único, pero $1_{\mathscr{C}[\Sigma^{-1}]}$ es un funtor con la misma propiedad (pues σ es iso para cada $\sigma \in \Sigma$) por lo tanto $\epsilon_0\epsilon = 1_{\mathscr{C}[\Sigma^{-1}]}$ y analogamente $\epsilon\epsilon_0 = 1_{\mathscr{B}}$. □

Corolario 1.9 Para una categoría pretriangulada $(\mathscr{C}, T, \triangle)$, las siguientes condiciones se satisfacen:

a) Tomo mono (respectivamente epi) es $\mathscr{C}$ es split-mono (respectivamente split-epi).

b) Si $\mathscr{C}$ es abeliano, entonces $\mathscr{C}$ es semisimple (i.e. $Ext^1_{\mathscr{C}}(X, Y) = 0 \quad \forall X, Y \in \mathscr{C}$).

Demostración. Se mostrará que todo epi en $\mathscr{C}$ es un split-epi.

Sea $f : X \to Y$ epi en $\mathscr{C}$, entonces $f^{op} : Y \to X$ es un mono en $\mathscr{C}^{op}$. Por el (ej. 5) sabemos que $(\mathscr{C}^{op}, \tilde{T}, \tilde{\triangle})$ es una categoría pretriangulada, y por el inciso a), como f^{op}es mono, entonces f^{op} es split-mono. Así f es split-epi en $\mathscr{C}^{op}$. □

14. Sea $(\mathscr{C}, T, \triangle)$ una categoría triangulada. Para cualquier $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{h} TA \in \triangle$ y $\beta : C \to C$ en $\mathscr{C}$, se tiene el siguiente diagrama conmutativo en $\mathscr{C}$:

$$
\begin{tikzcd}
 & W \arrow[r, "1_W"] \arrow[d] & W \arrow[d] & \\
A \arrow[r] \arrow[d, "1_A"] & E \arrow[r] \arrow[d] & D \arrow[r] \arrow[d, "\beta"] & TA \arrow[d, "1_{TA}"] \\
A \arrow[r, "f"] & B \arrow[r, "g"] \arrow[d] & C \arrow[r, "h"] \arrow[d] & TA \\
 & TW \arrow[r, "1_{TW}"] & TW &
\end{tikzcd}
$$

donde las filas y columnas, de dicho diagrama, son triángulos distinguidos.

Demostración. Por hipótesis se tiene la siguiente configuración inicial:

$$
\begin{tikzcd}
A \arrow[r, "f"] & B \arrow[r, "g"] & C \arrow[r, "h"] & TA \in \triangle \\
 & & D \arrow[u, "\beta"] &
\end{tikzcd}
$$

pasando a la categoría opuesta se tiene la siguiente situación:

$$
\begin{tikzcd}
C \arrow[r, "g^{op}"] \arrow[d, "\beta^{op}"] & B \arrow[r, "f^{op}"] & A \arrow[r, "\bar{T}(h^{op})"] & \bar{T}C \in \overline{\triangle} \\
D & & &
\end{tikzcd}
$$

ahora, aplicando el *cambio de cobase* se tiene el siguiente diagrama conmutativo en $\mathscr{C}^{op}$ donde filas y columnas son triángulos en $\overline{\triangle}$:

$$
\begin{tikzcd}
 & \overline{T}^{-1}W \arrow[r, "1_{\overline{T}^{-1}W}"] \arrow[d, "p^{op}"] & \overline{T}^{-1}W \arrow[d, "r^{op}"] & \\
\overline{T}^{-1}A \arrow[r, "\overline{T}^{-1}(\overline{T}(h^{op}))"] \arrow[d, "1_A"] & C \arrow[r, "g^{op}"] \arrow[d, "\beta^{op}"] & B \arrow[r, "f^{op}"] \arrow[d, "s^{op}"] & A \arrow[d, "1_A"] \\
\overline{T}^{-1}A \arrow[r, "a^{op}"] & D \arrow[r, "b^{op}"] \arrow[d, "q^{op}"] & E \arrow[r, "c^{op}"] \arrow[d, "t^{op}"] & A \\
 & W \arrow[r, "1_W"] & W &
\end{tikzcd}
$$

si rotamos a una vez a la derecha (por TR2) a los triángulos distinguidos que ocupan las filas centrales se obtiene la siguiente situación:

$$
\begin{tikzcd}
\overline{T}^{-1}W \arrow[r, "1_{\overline{T}^{-1}W}"] \arrow[d, "p^{op}"] & \overline{T}^{-1}W \arrow[d, "r^{op}"] & & \\
C \arrow[r, "g^{op}"] \arrow[d, "\beta^{op}"] & B \arrow[r, "f^{op}"] \arrow[d, "s^{op}"] & A \arrow[r, "-\overline{T}(-h^{op})"] \arrow[d, "1_A"] & \overline{T}C \arrow[d, "\overline{T}(\beta^{op})"] \\
D \arrow[r, "b^{op}"] \arrow[d, "q^{op}"] & E \arrow[r, "c^{op}"] \arrow[d, "t^{op}"] & A \arrow[r, "-\overline{T}(a^{op})"] & \overline{T}D \\
W \arrow[r, "1_W"] & W & &
\end{tikzcd}
$$

dado que $b^{op} \circ -h^{op} = a^{op}$ se deduce que $\overline{T}(\beta^{op}) \circ -\overline{T}(-h^{op}) = -\overline{T}(a^{op})$. Así pues el diagrama anterior es conmutativo.

De modo que pasando a la categoría opuesta los triángulos que ocupan las filas centrales y reescribiendo algunos morfismos se tiene el siguiente diagrama conmutativo en $\mathscr{C}$:

$$
\begin{tikzcd}
 & TW \arrow[r, "1_{TW}"] & TW & \\
A \arrow[r, "f"] & B \arrow[r, "g"] \arrow[u, "r"] & C \arrow[r, "h"] \arrow[u, "p"] & TA \\
A \arrow[r, "c"] \arrow[u, "1_A"] & E \arrow[r, "b"] \arrow[u, "s"] & D \arrow[r, "a"] \arrow[u, "\beta"] & TA \arrow[u, "1_A"] \\
 & W \arrow[r, "1_W"] \arrow[u] & W \arrow[u, "q"] &
\end{tikzcd}
$$

observe que cada fila y columna es un triangulo en $\triangle$ como se buscaba. Se concluye el ejercicio. $\square$