

Curvas de Rotación Galácticas

Ruiz Muñoz, Juan Manuel
Manchado Gándara, Miguel
Del Valle Cabañero, Jesús

May 13, 2022

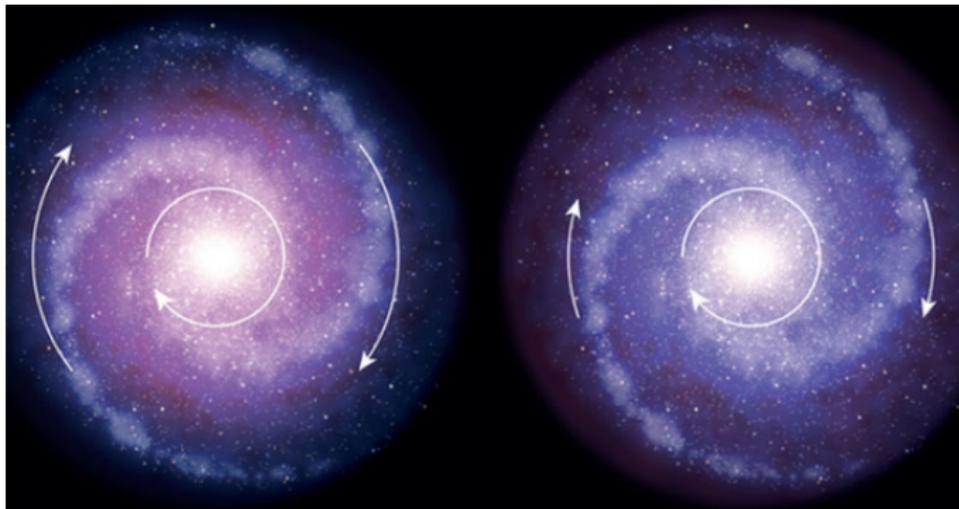
- 1 INTRODUCCIÓN HISTÓRICA
- 2 ¿CÓMO SE DEFINEN Y OBTIENEN?
- 3 ¿QUÉ ESPERAMOS TEÓRICAMENTE?
- 4 ¿QUÉ OBSERVAMOS?
- 5 MATERIA OSCURA Y **MOND**
- 6 REFERENCIAS



INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

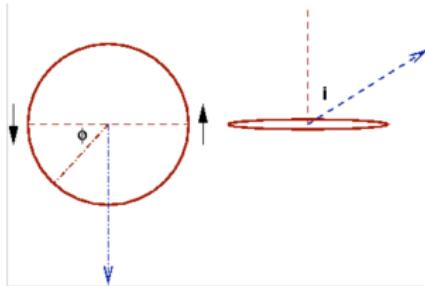
CURVAS DE ROTACIÓN GALÁCTICAS

Es la gráfica que da, en función de la distancia al centro de la galaxia, la velocidad con la que gira un objeto en órbita circular alrededor del centro galáctico.



CÓMO SE OBTIENEN

Consideramos una galaxia con rotación circular, con velocidad de rotación $V(R)$ y su eje de rotación formando un ángulo i con nuestra línea de visión



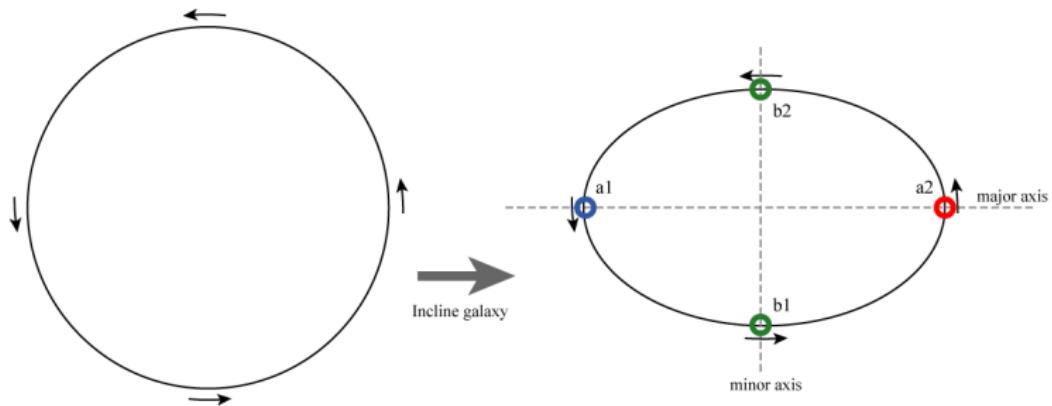
Si medimos la velocidad aparente en el disco en un ángulo ϕ , medido en el disco, entonces la velocidad en la linea de visión (radial) es:

$$V_r(R) = V_{sys} + V(R) \cos \phi \sin i$$

donde V_{sys} es la velocidad sistemática de la galaxia

CÓMO SE OBTIENEN

La proyección del disco circular será una elipse:



Se mide la velocidad sobre el eje mayor, paralelo a la línea de visión, quedando entonces que:

$$V(R) = \frac{V_r(R) - V_{sys}}{\sin i}$$

A través del efecto Doppler, observando la línea espectral conveniente, podemos medir la velocidad de la línea de visión:

$$\frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{emit}} = 1 + \frac{V_r}{c}$$

Las líneas de emisión observadas más comunes son:

- Línea H α : es común su uso en el disco visible de la galaxia y mide la rotación de las estrellas.
- Línea HI: se suele usar para medir más allá del disco visible. Mide la rotación de los discos de gas de hidrógeno neutro.

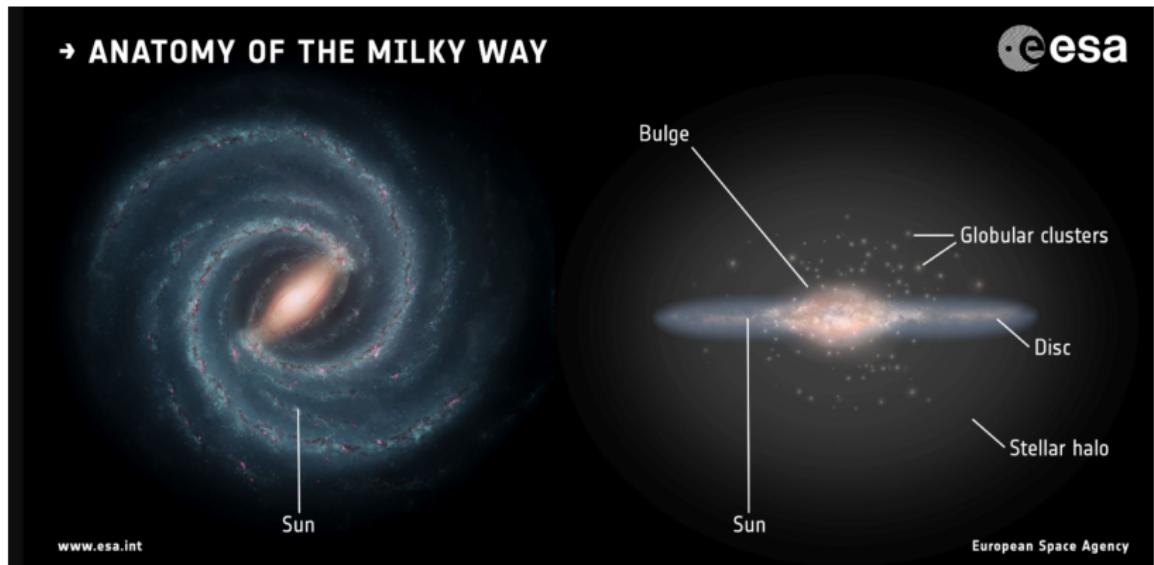
Midiendo el desplazamiento Doppler de las líneas espectrales de los puntos sobre el eje mayor diametralmente opuestos obtenemos dos curvas de rotación. La curva final se construye combinando ambas.

Suponiendo un cuerpo en movimiento circular, la dinámica newtoniana nos dice que la velocidad del cuerpo viene dada por:

Mecánica Newtoniana

$$\frac{M(R)mG}{R^2} = \frac{mV^2}{R} \iff V(R) = \sqrt{\frac{M(R)G}{R}}$$

CURVA TEÓRICA



CURVA TEÓRICA

Considerando la densidad constante hasta un cierto radio podemos afirmar que la masa encerrada es proporcional al cubo de la distancia al centro. Sobrepasado este valor de distancia, tendremos un comportamiento kepleriano.

A densidad constante, $M(R) \propto R^3$.

$$M(R) = \frac{4\pi}{3}\rho R^3$$

Tenemos, hasta dicha distancia, una relación de proporcionalidad directa entre la velocidad orbital y la distancia al centro de la galaxia.

Mecánica Newtoniana

$$V(R) = R \sqrt{\frac{4\pi}{3} G \rho} \iff V(R) \propto R$$

Pasada esta distancia al centro, que dependerá de la galaxia, empezaremos a observar un comportamiento kepleriano en la curva de velocidad. La materia ordinaria dentro de ese radio se mantendrá, prácticamente, constante.

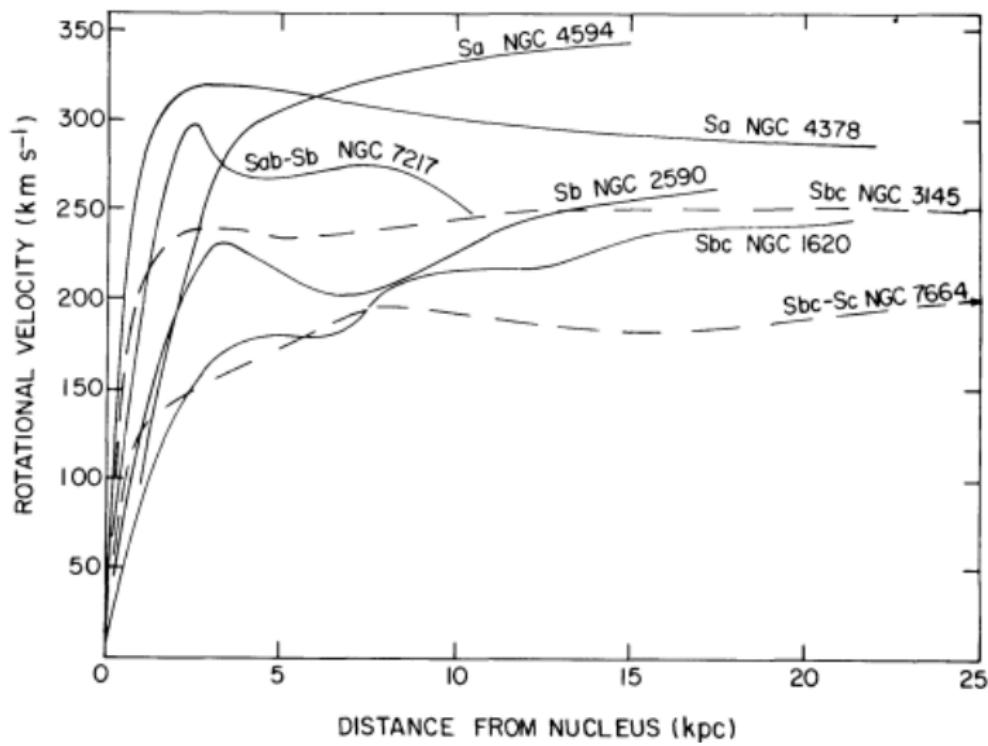
Mecánica Newtoniana - Velocidad orbital

$$V(R) = \sqrt{\frac{M(R)G}{R}} \iff V \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$

Velocidad orbital

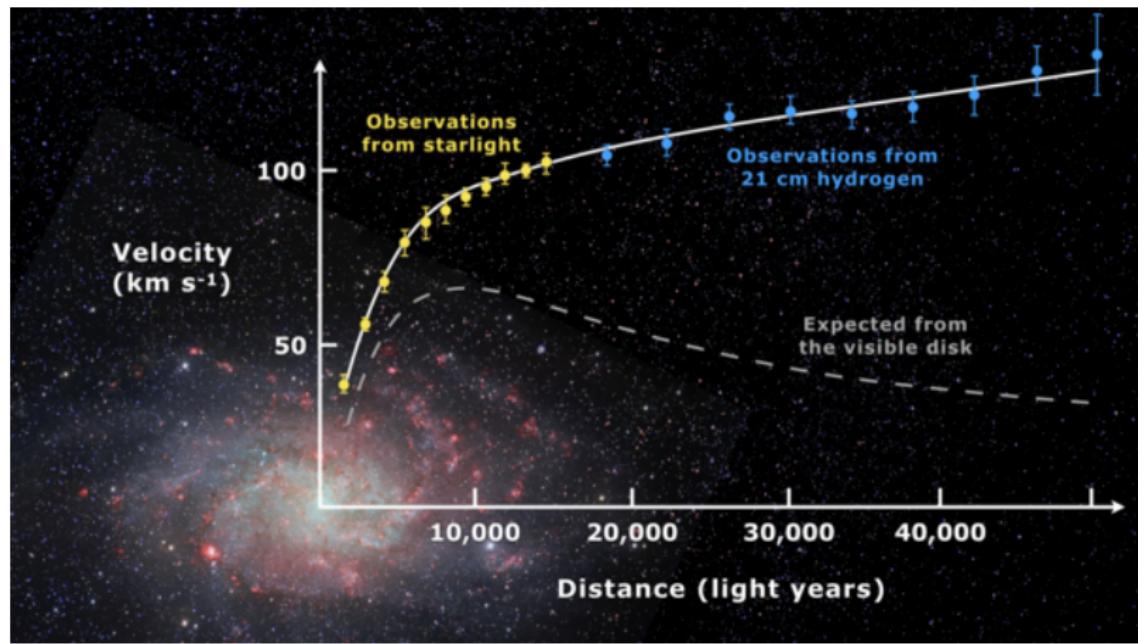
$$V(R) \propto \begin{cases} R & \text{si } R \lesssim R_0 \\ \frac{1}{\sqrt{R}} & \text{si } R \gtrsim R_0 \end{cases}$$

CURVAS OBSERVADAS



CURVAS OBSERVADAS

En la siguiente imagen podemos ver la curva de rotación medida de la galaxia M33 y la curva teórica que se esperaba obtener.



CURVAS OBSERVADAS

El comportamiento de que $V(R) \propto R$ se aproxima bastante bien a lo que se observa en el interior de las galaxias. No obstante, la disminución kepleriana de la velocidad de rotación a grandes distancias del núcleo no se observa. Es más, para la mayoría de las galaxias las curvas de rotación se hacen planas a distancias grandes. Es decir, a partir de cierto R :

$$V(R) = \sqrt{\frac{M(R)G}{R}} = cte$$

Esto implica un crecimiento lineal de la masa con el radio:

$$M(R) \propto R$$

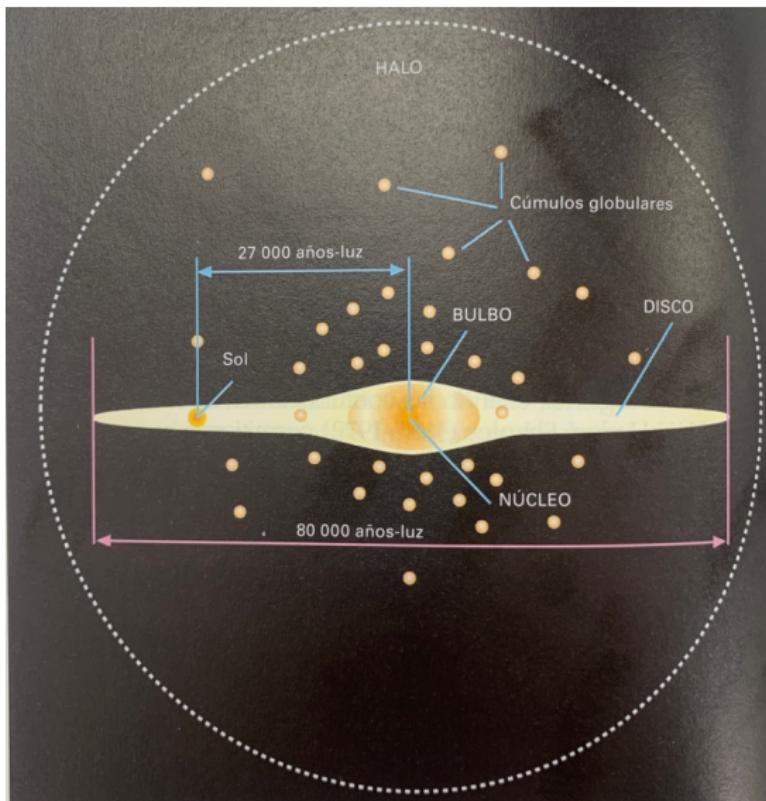
MATERIA OSCURA

- Masa central a partir de una distancia.
- Las velocidades caen con $r^{-1/2}$.
- Observamos curva plana $\rightarrow M(R) \propto R$.
- Debe de existir materia que no vemos, que llamaremos **oscura**.

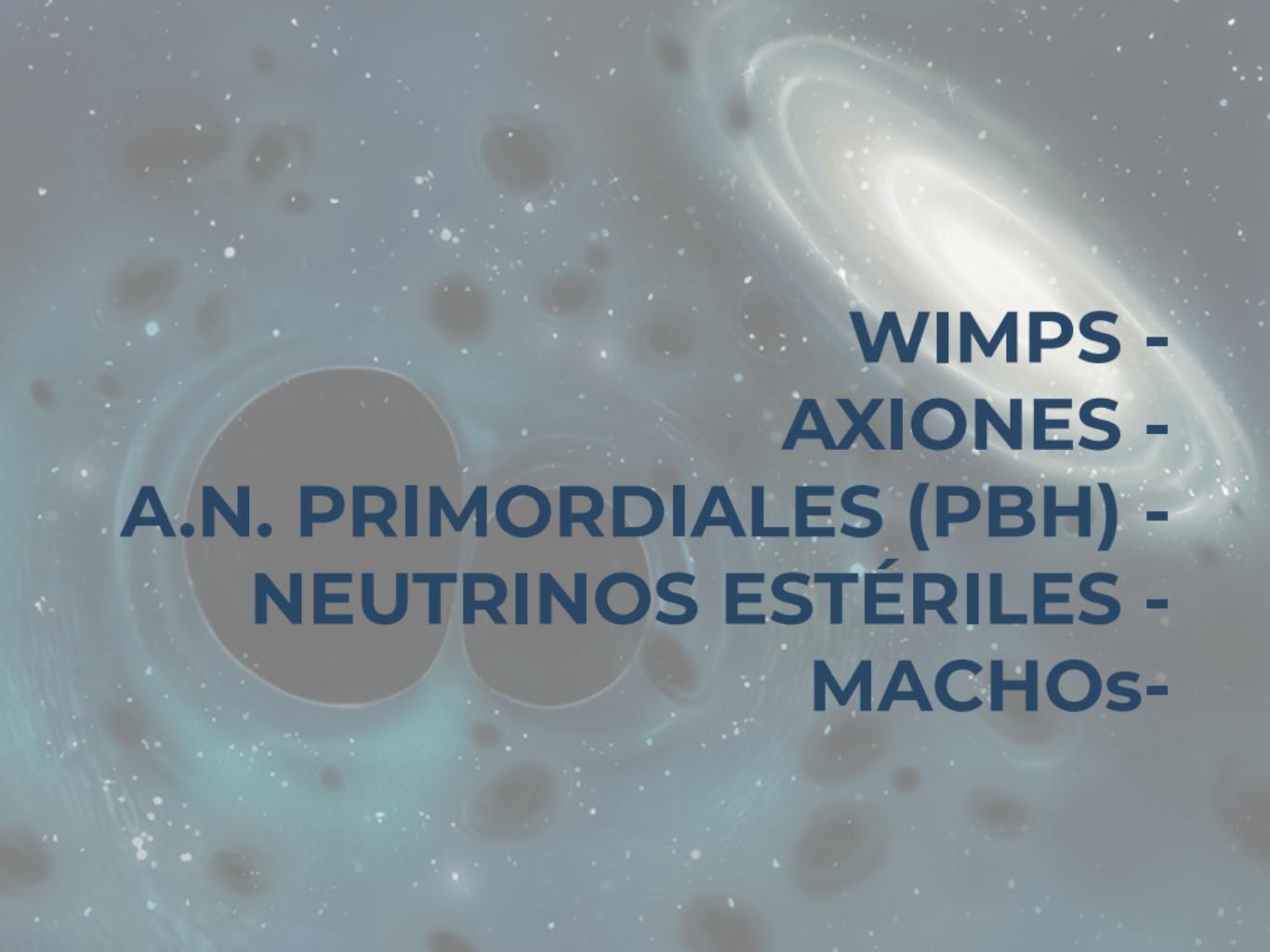
Ésta se encuentra en un halo galáctico esférico que envuelve la galaxia. Debe de seguir, la función de densidad, una relación $\rho(r) \propto \frac{1}{r^2}$.

- Interacciona más débilmente que la ordinaria.
- Se encuentra en un estado de máxima entropía.

MATERIA OSCURA



CANDIDATOS A MATERIA OSCURA



**WIMPS -
AXIONES -
A.N. PRIMORDIALES (PBH) -
NEUTRINOS ESTÉRILES -
MACHOs -**

Las galaxias son muchísimo más grandes que el sistema solar. **¿A partir de una cierta escala puede existir una transición entre la dinámica clásica para sistemas 'pequeños' y una dinámica más general a escalas galácticas?**

Podemos hacer uso de la aceleración centrípeta de una estrella $a_0 \approx 10^{-10} \text{ m/s}^2$. Esta será independiente de la escala. Por debajo de una aceleración característica debe de existir una corrección en las leyes clásicas. Donde a_0 jugará el mismo papel que \hbar en cuántica o c en relatividad.

Dinámica Newtoniana Modificada

- Para **aceleraciones grandes** ($g \gg a_0 \vee a_0 \rightarrow 0$) aplica la **dinámica newtoniana**.
- Para **aceleraciones pequeñas** ($g \ll a_0 \vee a_0 \rightarrow \infty$) se necesita una **modificación**.

Relación entre aceleración real, g , y la newtoniana, g_N .

$$g = \sqrt{g_N a_0}$$

- Para **aceleraciones grandes** ($g \gg a_0 \vee a_0 \rightarrow 0$) aplica la **dinámica newtoniana**.
- Para **aceleraciones pequeñas** ($g \ll a_0 \vee a_0 \rightarrow \infty$) se necesita una **modificación**.

Formulación

$$\mu \left(\frac{g}{a_0} \right) \vec{g} = \vec{g}_N \text{ donde } \begin{cases} \mu(x) \rightarrow 1 & \text{si } x \gg 1 \\ \mu(x) \rightarrow x & \text{si } x \ll 1 \end{cases}$$

Dinámica Newtoniana Modificada

Siendo, la órbita de una estrella, circular alrededor del centro galáctico y encerrada una masa $M = M(r) \equiv CTE$ tenemos que:

$$\frac{v^2}{r} = g = \sqrt{g_N a_0} = \sqrt{\frac{G M a_0}{r^2}}$$

La velocidad circular no depende de la distancia al centro

$$v^4 = G M a_0$$

REFERENCIAS

- Apuntes de la asignatura Astrofísica Estelar de la Universidad de Alicante del curso 2021 - 2022, J.A.Pons.
- *Astronomy*, Fraknoi A., Morrison D., Wolff S. C., Foothill College, OpenStax, 2016
- <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0010594.pdf>
- <https://jila.colorado.edu/~pja/astr3830/lecture17.pdf>
- <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1978ApJ...225L.107R>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_rotation_curve
- https://en.wikipedia.org/wiki/Modified_Newtonian_dynamics
- https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/115885/1/ESTUDIO_DE_LA_MATERIA_OSCURA_A_ESCALAS_GALACTICAS_Monllor_Berbegal_Oscar.pdf
- <https://www.discovermagazine.com/the-sciences/what-is-dark-matter-made-of-these-are-the-top-candidates>



PROHIBIDO
PREGUNTAR
MUCHAS
COSAS

VENCAS