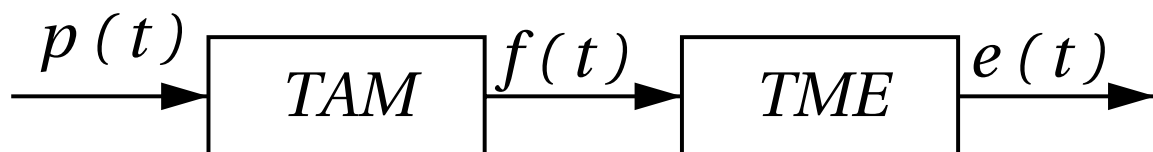


Tema 5

Micrófonos

5.1 Introducción

El *micrófono* es el transductor diseñado especialmente para convertir las señales acústicas en señales eléctricas



Sensibilidad

Mide la capacidad de captación del micrófono

Se define como el módulo del cociente entre la tensión eléctrica en bornes del micrófono cuando está en circuito abierto y la presión que incide sobre su diafragma en campo libre

$$S = \left| \frac{\widehat{e}}{\widehat{p}} \right|$$

5.1 Introducción

Su unidad fundamental es el V/Pa, pero también se expresa en mV/Pa o mV/μbar

$$1 \text{ V/Pa} = 10^3 \text{ mV/Pa} = 10^2 \text{ mV/}\mu\text{bar}$$

También se suele expresar en decibelios, indicando la sensibilidad de referencia S_0

$$S_{dB} = 20 \log \frac{S}{S_0} = 20 \log \left| \frac{\hat{e}}{\hat{p}} \right|$$

Salvo que se especifique lo contrario, la sensibilidad se da a la frecuencia de 1 kHz para ondas incidentes en el eje

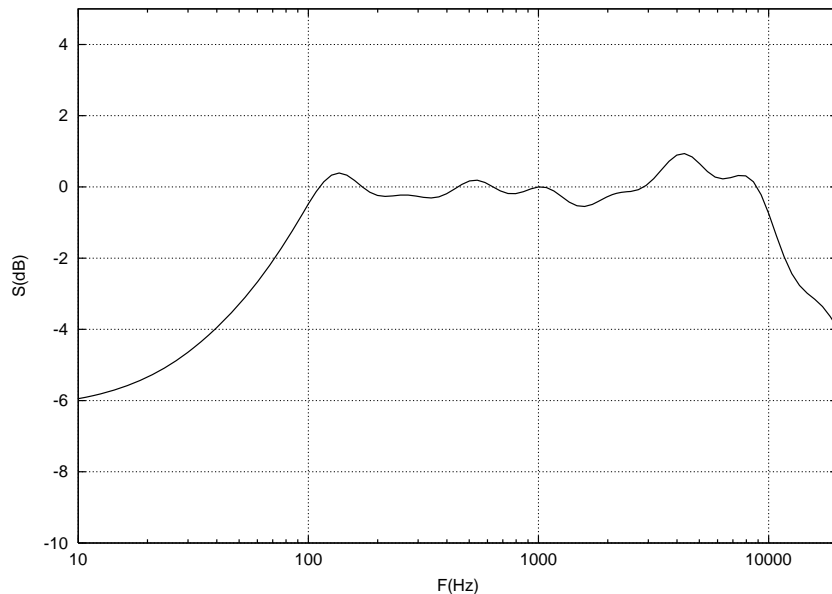
Respuesta en frecuencia

Define el comportamiento del micrófono con la frecuencia

Viene dada mediante una gráfica donde se representa la sensibilidad frente a la frecuencia

Si la representación es en dB se suele normalizar respecto a la sensibilidad de 1 kHz

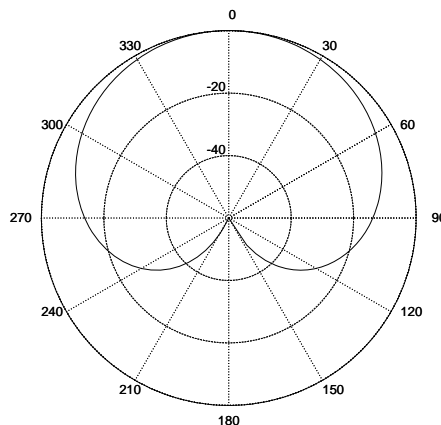
5.1 Introducción



Directividad

Respuesta del micrófono en función del ángulo con que incide una onda sonora

Se representa mediante el *diagrama de directividad*: gráfico en coordenadas polares de sensibilidad frente a ángulo, a una frecuencia



5.1 Introducción

Ecuación polar

Es la ecuación matemática de la directividad, normalizada a su valor máximo

$$R(\theta) = \frac{S(\theta)}{S_{max}}$$

Factor e índice de directividad

El *factor de directividad* en una dirección dada (θ_0, ϕ_0) es el cociente del cuadrado de la tensión generada por la onda incidente en esa dirección, y la media a todas las direcciones del cuadrado de la tensión con la misma presión cuadrática media incidente

$$Q(\theta_0, \phi_0) = \frac{S^2(\theta_0, \phi_0)}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} S^2(\theta, \phi) d\Omega}$$

Cuando existe simetría de revolución

$$Q(\theta_0) = \frac{S^2(\theta_0)}{\frac{1}{2} \int_0^\pi S^2(\theta) \sin \theta d\theta}$$

Si el *factor de directividad* se expresa en *dB* recibe el nombre de *índice de directividad*

$$DI = 10 \log Q$$

5.1 Introducción

Eficiencia media de energía (*Random Energy Efficiency*)

Es el cociente entre la media de la energía captada por el micrófono en todas las direcciones y la energía captada cuando la onda incide en su eje de máxima captación

$$\begin{aligned} REE &= \frac{\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} \frac{e^2(\theta, \phi)}{R} d\Omega}{\frac{e_{max}^2}{R}} \\ &= \frac{\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} S^2(\theta, \phi) d\Omega}{S_{max}^2} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} R^2(\theta, \phi) d\Omega \end{aligned}$$

Factor distancia

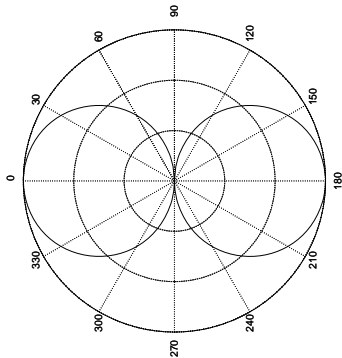
Es la distancia relativa a la que hay que situar un micrófono omnidireccional, con la misma captación en el eje que el micrófono que se considera, para que la captación media en todas las direcciones sea la misma en ambos casos

$$FD = \frac{1}{\sqrt{REE}}$$

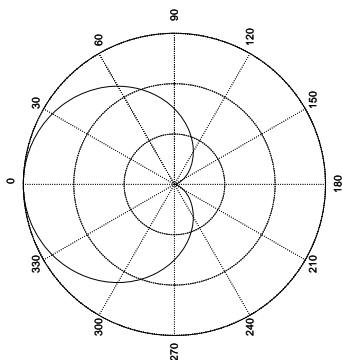
Patrones directivos estándar

Patrón	$R(\theta)$	REE	FD
Omnidireccional	1	1	1
Bidireccional	$\cos \theta$	0,33	1,7
Cardioide	$\frac{1}{2}(1 + \cos \theta)$	0,33	1,7
Supercardioide	$\frac{1}{2}[(\sqrt{3} - 1) + (3 - \sqrt{3}) \cos \theta]$	0,268	1,9
Hipercardioide	$\frac{1}{4}(1 + 3 \cos \theta)$	0,25	2
Bidirecc. 2° orden	$\cos^2 \theta$	0,2	2,2
Cardioide 2° orden	$\frac{1}{2}(1 + \cos \theta) \cos \theta$	0,133	2,7

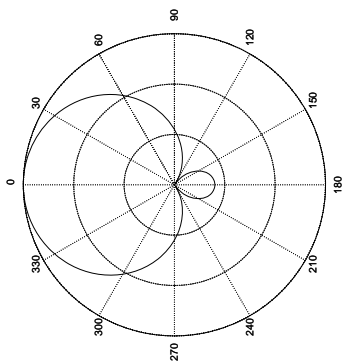
5.1 Introducción



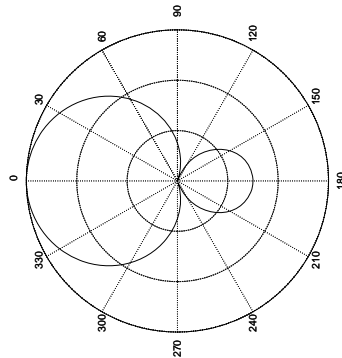
(a) Bidireccional



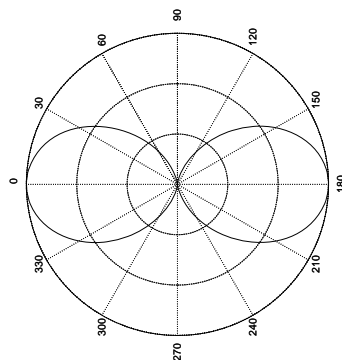
(b) Cardioide



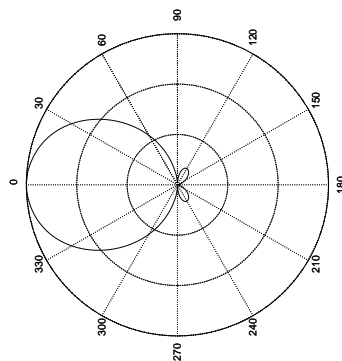
(c) Supercardioide



(d) Hipercardioide



(e) Bidireccional 2°



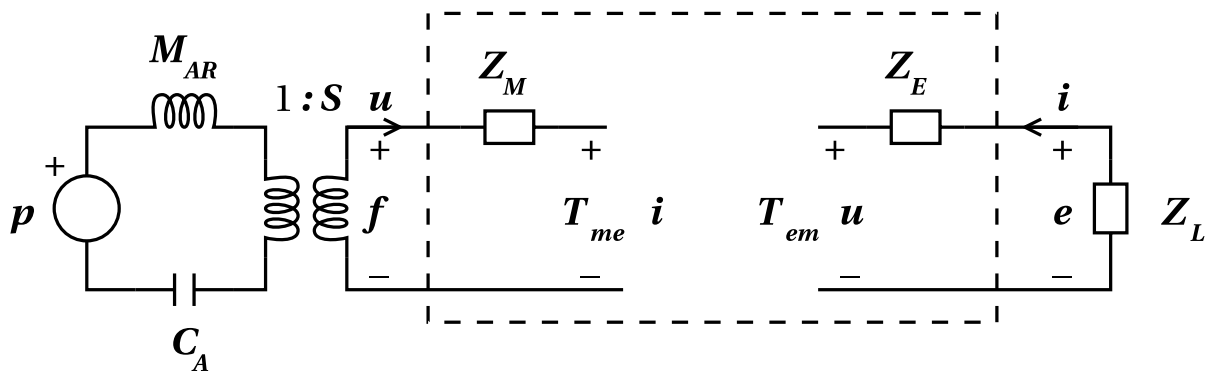
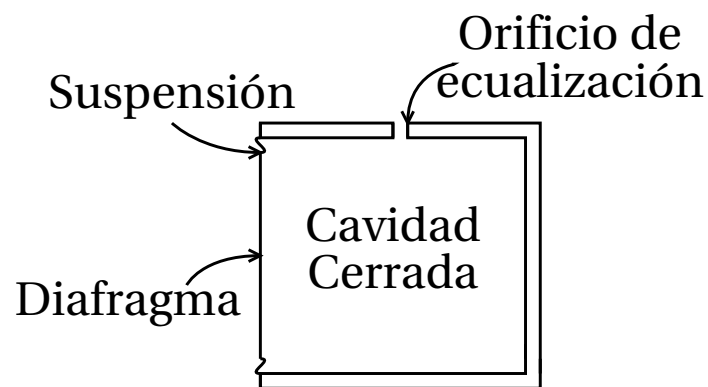
(f) Cardioide 2°

5.2 Micrófonos según el TAM

Micrófonos de presión

Responden a las variaciones de la presión sonora

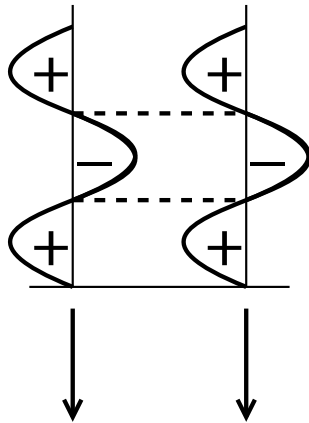
Están formados por un diafragma flexible en una cavidad cerrada



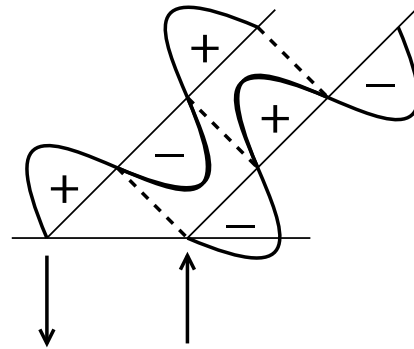
Mientras la longitud de onda no sea muy pequeña, se pueden considerar como micrófonos omnidireccionales

5.2 Micrófonos según el TAM

A muy altas frecuencias se producen fenómenos de interferencia



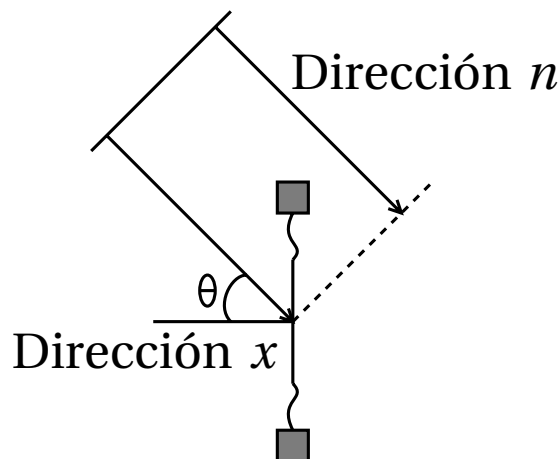
Refuerzo



Atenuación

Micrófonos de gradiente de presión o velocidad

No tienen una cápsula que aisle la parte trasera del diafragma de la delantera



5.2 Micrófonos según el TAM

La presión neta en el diafragma es la diferencia entre las presiones frontal \hat{p}_i y trasera $\hat{p}_i + \Delta\hat{p}_i$

Cuando el análisis se restringe al margen de bajas frecuencias

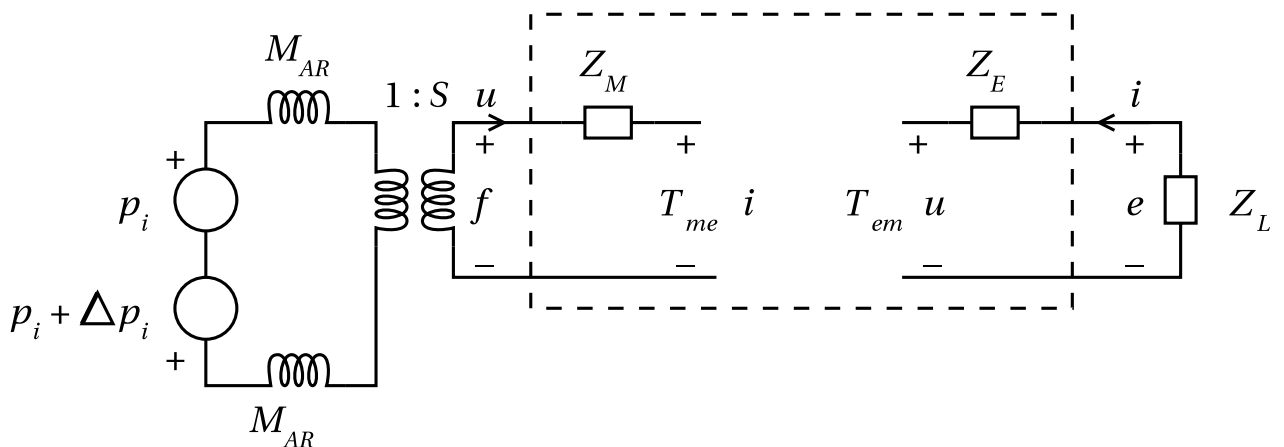
$$\Delta\hat{p}_i \cong \frac{\partial\hat{p}_i}{\partial x} \Delta l = \frac{\partial\hat{p}_i}{\partial n} \cos \theta \Delta l$$

donde Δl es la distancia efectiva entre las dos caras del diafragma

Si la onda incidente es una onda plana

$$\Delta\hat{p}_i = -jk\hat{p}_0 e^{-jkx} \cos \theta \Delta l = -jk\hat{p}_i \cos \theta \Delta l$$

El cambio de presión es proporcional al $\cos \theta$, por tanto, el micrófono es de carácter bidireccional



5.2 Micrófonos según el TAM

Efecto proximidad

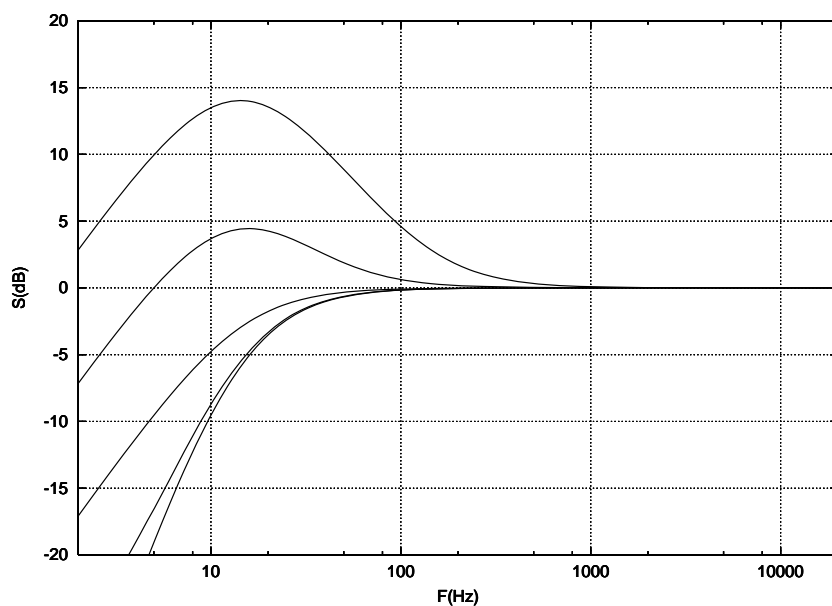
Si la onda incidente es una onda esférica

$$\Delta \hat{p}_i \cong \frac{\partial \hat{p}_i}{\partial r} \cos \theta \Delta l = - \left(\frac{1}{jkr} + 1 \right) jk \hat{p}_i \cos \theta \Delta l$$

Cuando $kr \gg 1$, la presión sobre el diafragma es la misma que para ondas planas

Cuando $kr \ll 1$, la presión sobre el diafragma es mucho mayor que para ondas planas

La respuesta del micrófono a una frecuencia crece al acercarse a la fuente: es el llamado *efecto proximidad*



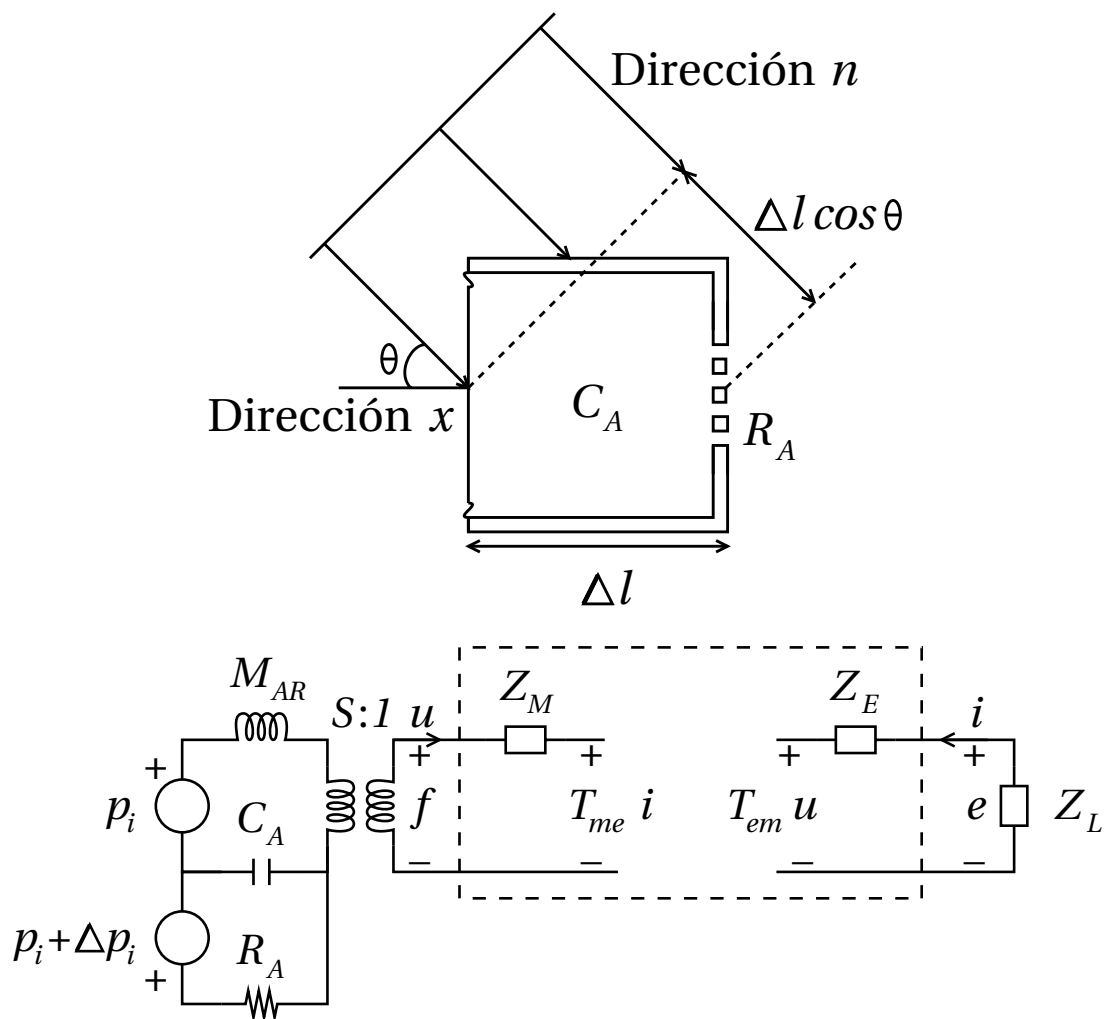
5.2 Micrófonos según el TAM

Micrófonos combinados

Responden a la vez a la presión y al gradiente de presión

Tienen una cavidad detrás del diafragma provista de una apertura al exterior, lo que permite al sonido llegar a la cara posterior del diafragma con un desfase controlado

Por ejemplo



5.2 Micrófonos según el TAM

Como un circuito eléctrico es un sistema lineal, la presión neta sobre el diafragma es una combinación lineal de la presión producida por los dos generadores

$$\begin{aligned}\hat{p}_D &= \hat{C} \hat{p}_i + \hat{D} (\hat{p}_i + \Delta \hat{p}_i) \\ &= \hat{A} + \hat{B} \cos \theta\end{aligned}$$

El valor de \hat{A} depende del tiempo que tarda el frente de onda en rodear la cápsula hasta alcanzar la apertura posterior

El valor de \hat{B} depende del desfase introducido por la red acústica de la cápsula

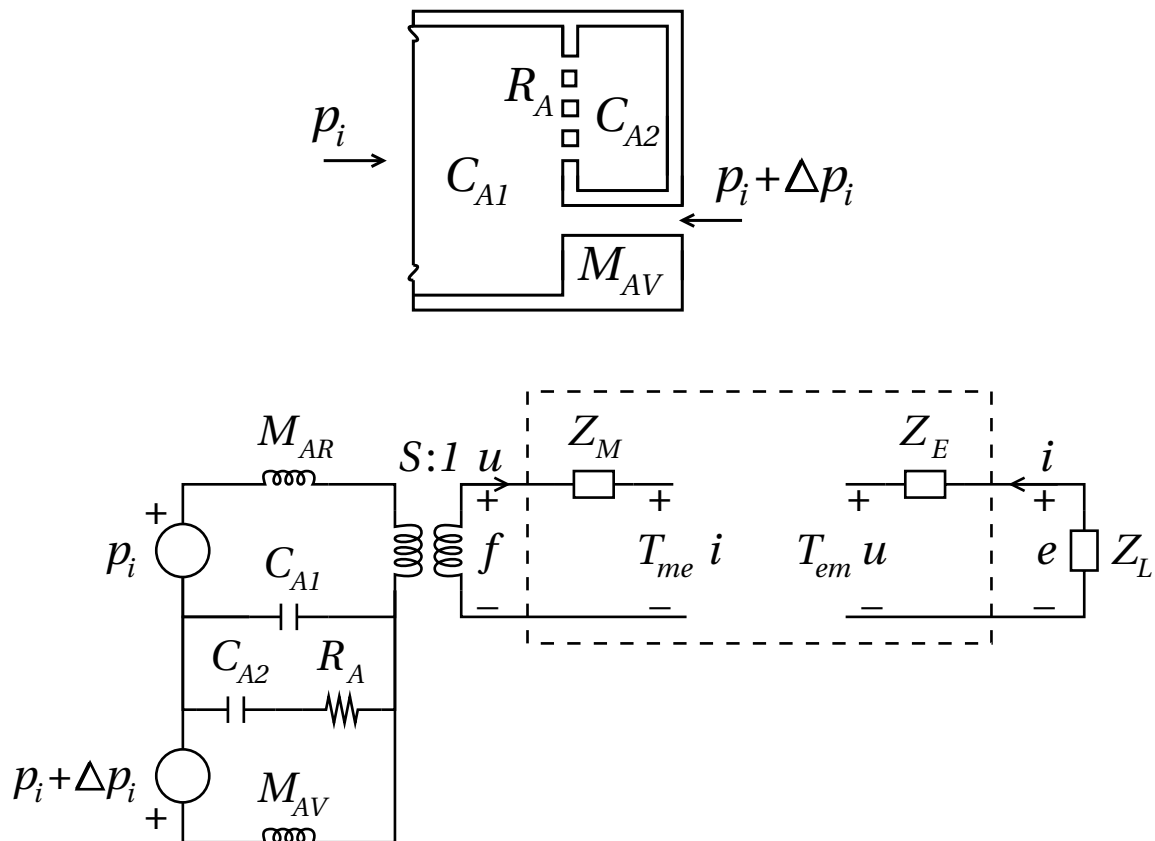
En un micrófono de presión, la ausencia de red acústica provoca que $\hat{B} = 0$: el micrófono es omnidireccional

En un micrófono de gradiente de presión, la ausencia de cápsula provoca que $\hat{A} = 0$: el micrófono es bidireccional

En general, todos los patrones directivos pueden generarse a partir de las proporciones adecuadas entre \hat{A} y \hat{B}

5.3 Micrófonos según el TME

Otro ejemplo



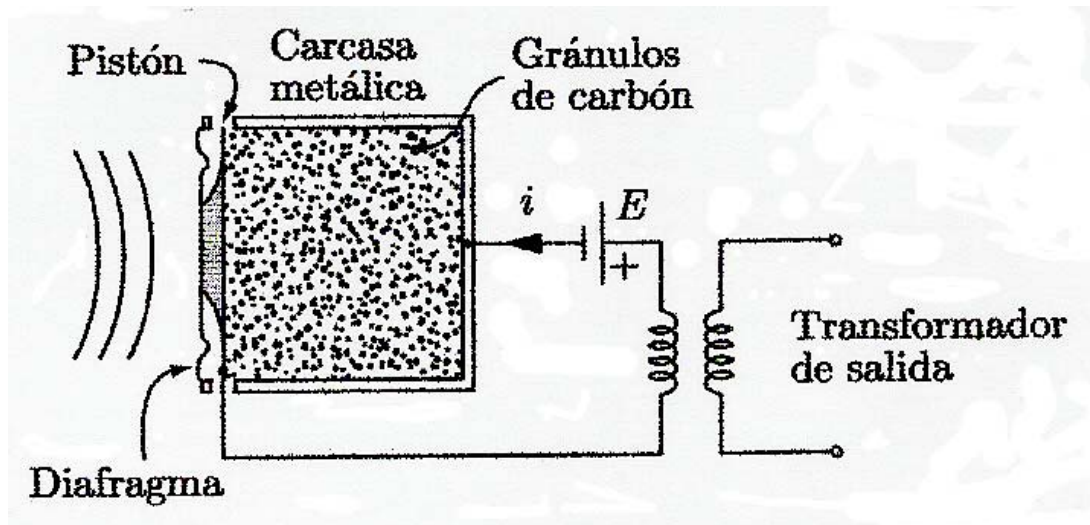
5.3 Micrófonos según el TME

El transductor mecánico–eléctrico determina, a excepción de la directividad, todas las demás características del micrófono

Micrófono de carbón

Utiliza una cápsula compuesta por granulos de carbón

5.3 Micrófonos según el TME



Cuando el diafragma vibra, un pistón aplasta los granos modificando su resistencia

Aparece entonces en el circuito una intensidad que varía conforme a la onda sonora

Sus características principales son

Fidelidad Respuesta pobre y mediocre, de entre 100 Hz y 4500 Hz

Sensibilidad Muy elevada

Directividad Omnidireccionales

Ruido Muy ruidosos

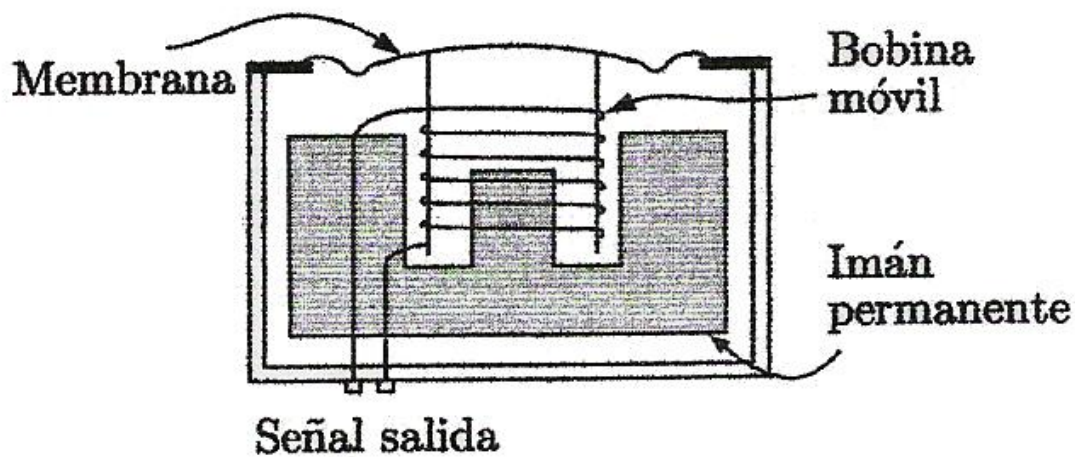
Impedancia interna Baja

Uso Mensaje sonoro. Prácticamente en desuso

5.3 Micrófonos según el TME

Micrófono de bobina móvil

Constan de una bobina unida a una membrana que se desplaza bajo el efecto de las ondas sonoras en un campo magnético



Fidelidad Respuesta amplia y regular, de 50 Hz a 15 kHz

Sensibilidad Buena

Directividad Omnidireccionales y direccionales

Ruido Bajo

Impedancia interna Baja

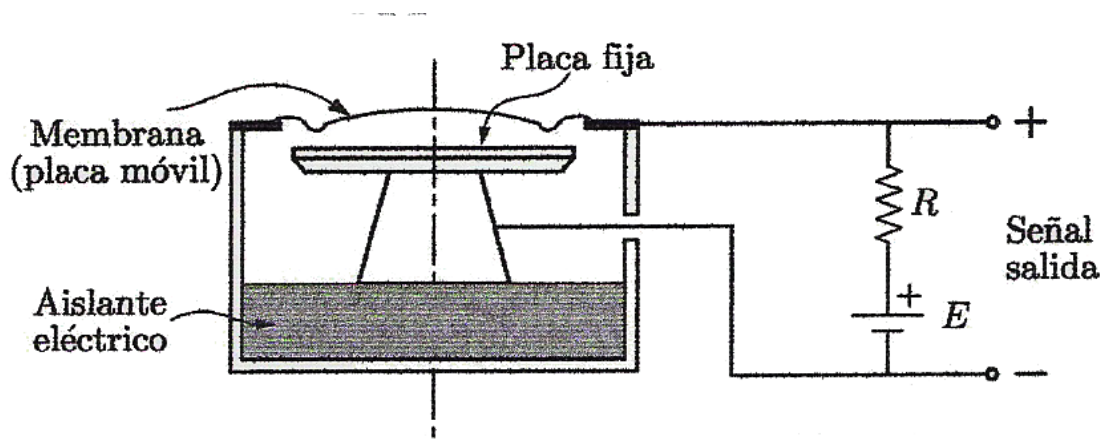
Otros Robustos y seguros, sin fuente exterior

Uso Radiodifusión y grabaciones domésticas

5.3 Micrófonos según el TME

Micrófono electrostático

Se basan en un transductor electrostático que opera como receptor



Fidelidad Respuesta extremadamente plana, de 20 Hz a 20 kHz

Sensibilidad Alta

Directividad Omnidireccionales y direccionales

Ruido Muy bajo

Impedancia interna Muy elevada

Otros Muy delicados y caros, necesitan energía exterior

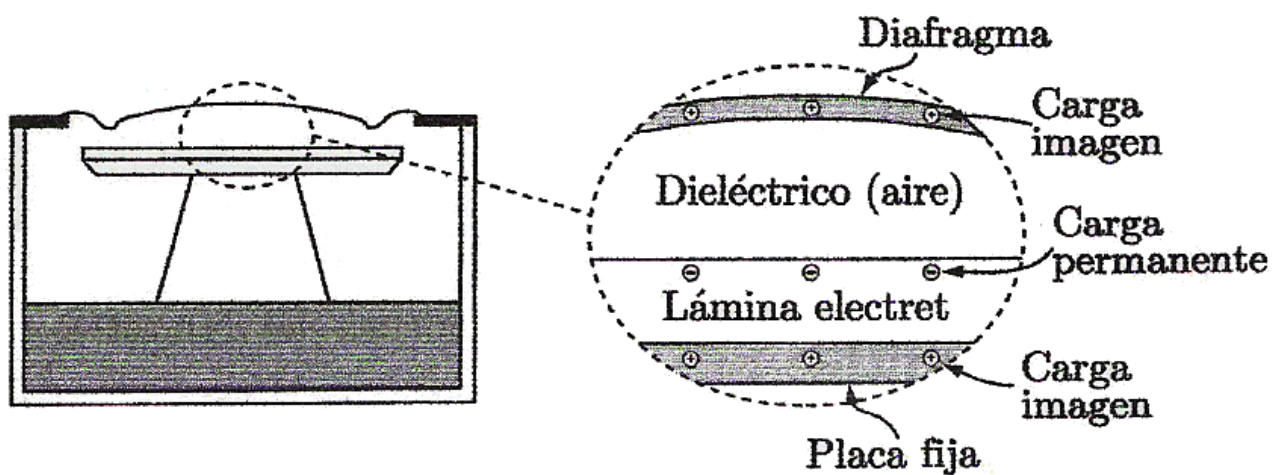
Uso Calibración, instrumentación y grabaciones de calidad

5.3 Micrófonos según el TME

Micrófono de electrec

El término *electrec* se refiere a materiales que muestran una polarización permanente después de ser sometidos a un campo eléctrico intenso

Usando estos materiales se pueden diseñar transductores electrostáticos que evitan la fuente de tensión externa

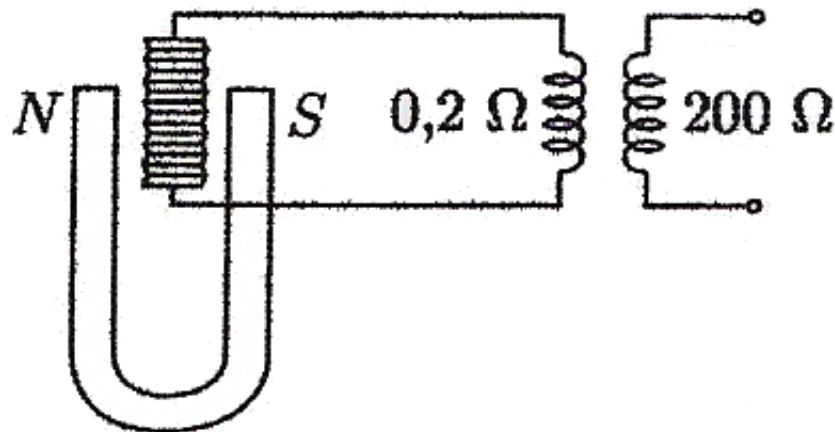


Sus características son comunes a los micrófonos electrostáticos, pero con menor sensibilidad que los polarizados externamente (porque se crea un campo eléctrico de menor magnitud)

5.3 Micrófonos según el TME

Micrófono de cinta

Consisten en un conductor plano que actúa como diafragma (la *cinta*) suspendido en un campo magnético transversal

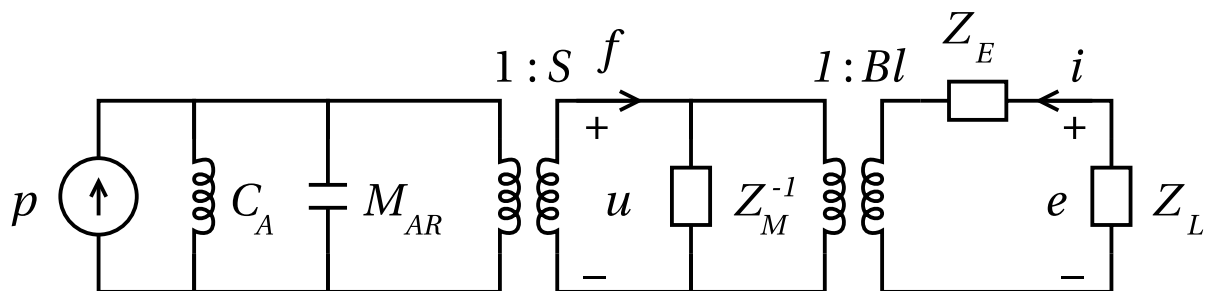


La masa del diafragma es muy baja, y esto proporciona características comparables a las de un micrófono de condensador. Sin embargo

- Los imanes que generan el campo magnético afectan a la respuesta polar del micrófono
- Las cintas presentan resonancias y armónicos muy acusados que es necesario controlar
- Presentan una resistencia muy baja y una salida de tensión extraordinariamente baja

5.4 Micrófono de bobina móvil

Sea un micrófono de bobina móvil en una cápsula de presión



Sin tener en cuenta los efectos de los elementos acústicos del sistema, la velocidad con la que se mueve el diafragma en circuito abierto es

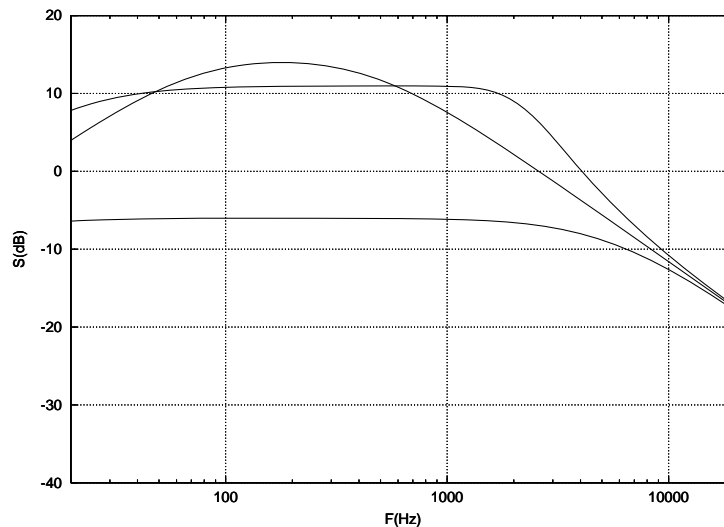
$$\hat{u} = \frac{\hat{f}}{\hat{Z}_M} = \frac{S \hat{p}}{\hat{Z}_M}$$

La sensibilidad del micrófono resulta entonces

$$S = \left| \frac{\hat{e}}{\hat{p}} \right| = \frac{Bl |\hat{u}|}{\frac{|\hat{u}| |\hat{Z}_M|}{S}} = \frac{Bl S}{|\hat{Z}_M|}$$

Para evitar la dependencia con la frecuencia en la respuesta se plantean dos posibilidades

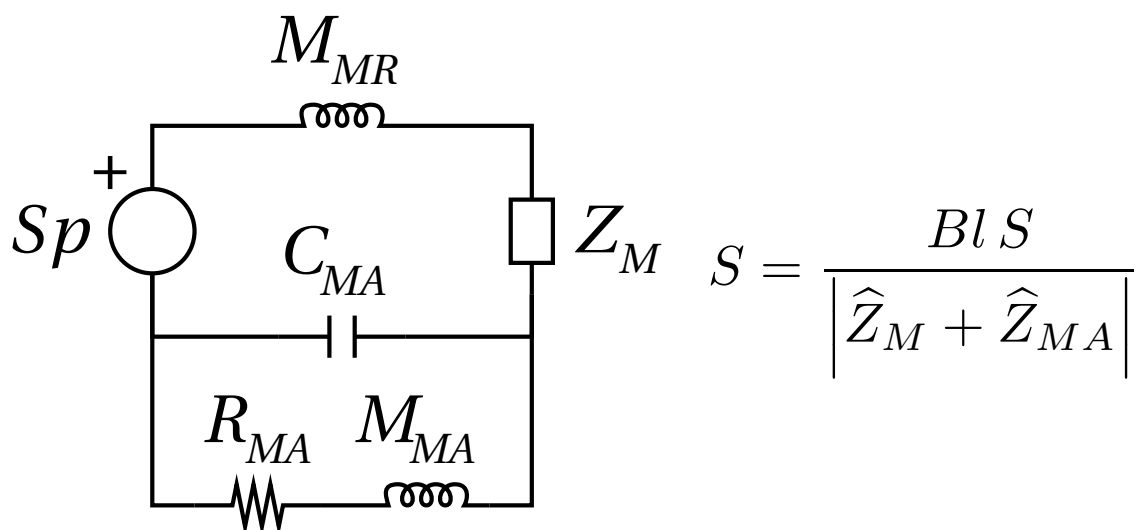
5.4 Micrófono de bobina móvil



- Añadir una resistencia mecánica adicional que cumpla $R'_M \gg |\hat{Z}_M|$

$$S \approx \frac{Bl S}{R'_M}$$

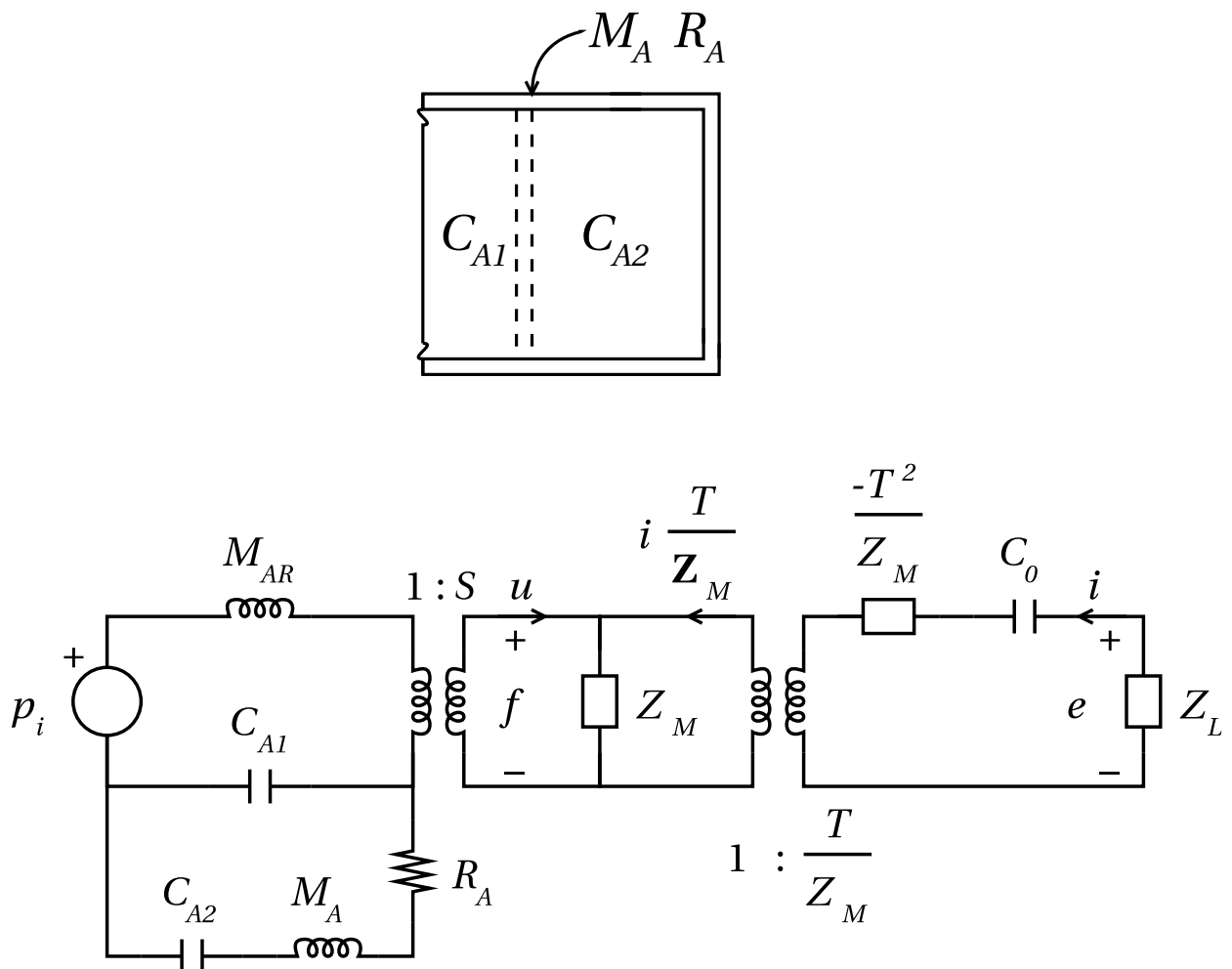
- Añadir un circuito antirresonante que compense la reactancia mecánica



5.5 Micrófono electrostático

5.5 Micrófono electrostático

Sea un micrófono electrostático en una cápsula de presión



Sin tener en cuenta los efectos de los elementos acústicos del sistema, en circuito abierto

$$\hat{e} = \frac{1}{\hat{Z}_M} \frac{E_P}{j\omega d_0} S \hat{p}$$

5.5 Micrófono electrostático

La sensibilidad del micrófono resulta entonces

$$S = \left| \frac{\widehat{e}}{\widehat{p}} \right| = \frac{1}{\left| \widehat{Z}_M \right|} \frac{E_P \pi a^2}{\omega d_0}$$

La masa del diafragma es muy pequeña y el sistema se diseña para tener pocas pérdidas

$$\left| \widehat{Z}_M \right| \cong \frac{1}{\omega C_M}$$

Entonces

$$S \cong \frac{C_M E_P \pi a^2}{d_0}$$

La compliancia C_M de una membrana esférica se puede expresar, para $ka \lesssim 1$

$$C_M \cong \frac{1}{8\pi T}$$

donde T es la tensión mecánica a la que se encuentra sometida la membrana. Así

$$S \cong \frac{E_P a^2}{8T d_0}$$

Para frecuencia superiores el comportamiento del micrófono no es bueno

5.5 Micrófono electrostático

La frecuencia

$$f_H = \frac{c}{2\pi a}$$

marca un límite superior para el funcionamiento del micrófono. En esta ecuación c es la velocidad del sonido pero en el diafragma

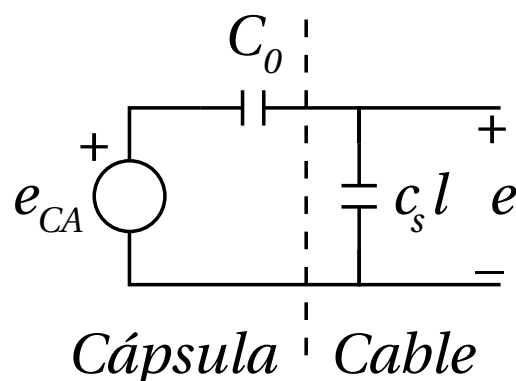
$$c = \sqrt{\frac{T}{\sigma}}$$

donde σ es la masa por unidad de superficie del diafragma. Así

$$f_H = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{T}{\sigma}}$$

Preamplificador microfónico

Sea un micrófono electrostático conectado directamente a un cable coaxial



5.5 Micrófono electrostático

donde c_s es la capacidad del cable por unidad de longitud y l es su longitud

La tensión a la salida del cable es

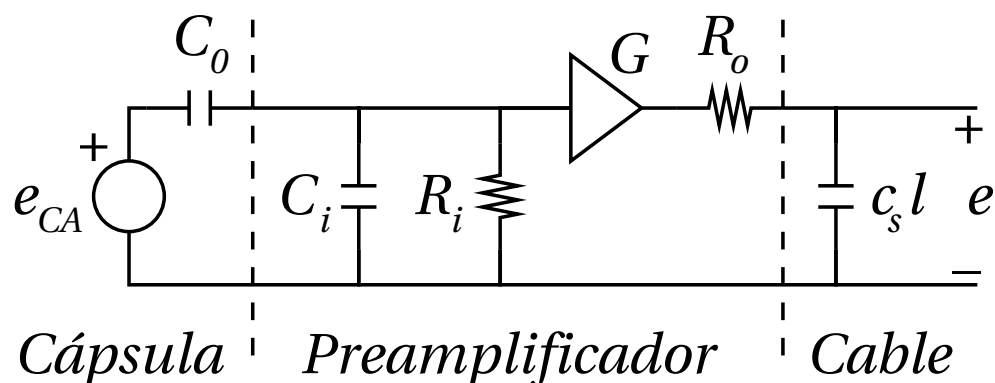
$$\hat{e} = \hat{e}_{CA} \frac{C_0}{C_0 + c_s l}$$

Valores típicos de las capacidades son

$$C_0 \cong 18 \text{ pF}; \quad c_s \cong 100 \text{ pF/m}$$

Entonces, sólo 20 cm de cable reducen a la mitad la tensión de salida

El preamplificador microfónico es el encargado de adaptar el alto valor de impedancia de un micrófono de condensador a un valor bajo



Esto se consigue empleando transistores de efecto campo