

# Sesión 4. Práctica 1: Diseño de un microactuador

M. Meis<sup>1,2</sup> y F. Varas<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Vigo, <sup>2</sup>Vicus Desarrollos Tecnológicos, S.A.,

<sup>3</sup>Universidad Politécnica de Madrid

Introducción a la Simulación Numérica Multifísica con  
ELMER  
6–7 de julio de 2015



Unión Europea  
FEDER



Invertimos en su futuro



# Proyecto CloudPYME

El proyecto CloudPYME (ID 0682\_CLOUDPYME2\_1\_E) está cofinanciado por la Comisión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), dentro de la tercera convocatoria de proyectos del Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España–Portugal 2007–2013 (POCTEP).



Unión Europea  
FEDER



Invertimos en su futuro

# Plan

- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 Problema Resuelto
  - Formulación del problema
  - Ejemplo resuelto en `Elmer Tutorials`
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Plan

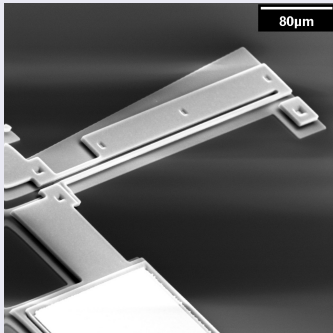
- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 Problema Resuelto
  - Formulación del problema
  - Ejemplo resuelto en `Elmer Tutorials`
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Plan

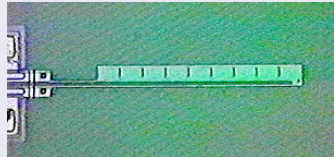
- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 Problema Resuelto
  - Formulación del problema
  - Ejemplo resuelto en `Elmer Tutorials`
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Actuador microelectromecánico

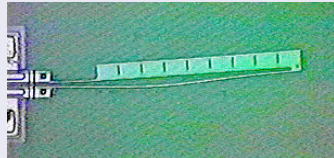
## Guckel electro-thermal actuator (MEMS)



Sin tensión eléctrica

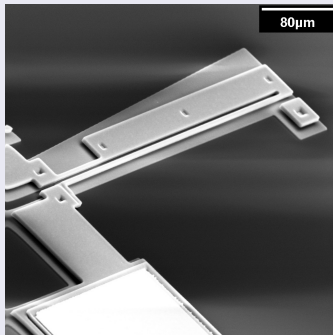


Con tensión eléctrica



# Comportamiento de actuador microelectromecánico

## Guckel electro-thermal actuator (MEMS)



### Fenómenos implicados

- problema eléctrico
- problema térmico  
(disipación Joule)
- problema mecánico  
(tensiones térmicas)

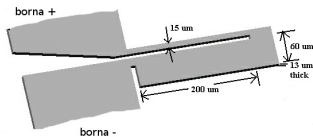
# Plan

- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 Problema Resuelto
  - Formulación del problema
  - Ejemplo resuelto en `Elmer Tutorials`
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2



# Modelado de actuador microelectromecánico

## Problema eléctrico



$$\operatorname{div}(k_e \vec{\nabla} V) = 0$$

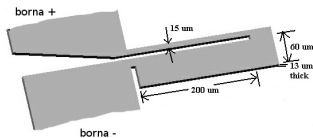
$$\begin{aligned} V &= 0 && \text{en borina -} \\ V &= V_f && \text{en borina +} \\ k_e \vec{\nabla} V \cdot \vec{n} &= 0 && \text{en resto} \end{aligned}$$

## Modelo de elementos finitos

$$K_e V_h = b_e$$

# Modelado de actuador microelectromecánico (II)

## Problema térmico



$$-\operatorname{div}(k_t \vec{\nabla} T) = q_J$$

$$\text{con } q_J = \frac{1}{k_e} \|\vec{\nabla} V\|^2$$

$$T = T_b \quad \text{bornas}$$

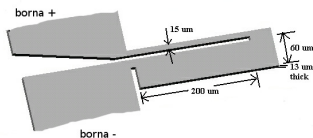
$$-k_t \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\text{aire}}) \quad \text{resto}$$

## Modelo de elementos finitos

$$K_t T_h = b_t(V_h)$$

# Modelado de actuador microelectromecánico (III)

## Problema mecánico



$$-\operatorname{div} \sigma = \vec{f}$$

con  $\sigma = C\epsilon(\vec{u}) - \alpha(T - T_{aire})I$

$$\vec{u} = \vec{0} \quad \text{bornas}$$
$$\sigma \vec{n} = \vec{0} \quad \text{resto}$$

## Modelo de elementos finitos

$$K_m u_h = b_m(T_h)$$

# Modelo completo del actuador

## Modelo de elementos finitos completo

mod. eléctrico	$K_e V_h = b_e$
mod. térmico	$K_t T_h = b_t(V_h)$
mod. mecánico	$K_m u_h = b_m(T_h)$

## Estrategia de resolución

### Resolución (segregada) secuencial

- se calcula potencial  $V_h$  en mod. eléctrico
- se calcula temperatura  $T_h$  en mod. térmico
- se calcula desplazamiento  $u_h$  en mod. mecánico

# Plan

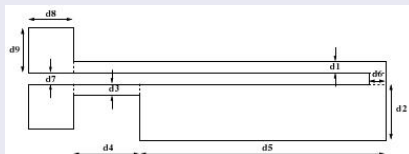
- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 Problema Resuelto
  - Formulación del problema
  - Ejemplo resuelto en `Elmer Tutorials`
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Plan

- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 **Problema Resuelto**
  - **Formulación del problema**
  - Ejemplo resuelto en `Elmer Tutorials`
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Formulación del problema

## Diseño geométrico del actuador



N.D. Mankame, G.K. Ananthasuresh; *Comprehensive thermal modelling and characterization of an electro-thermal-compliant microactuator*, Journal of Micromechanics and Microengineering 11 (2001) 452–462.

## Formulación del problema (cont.)

### Datos del diseño de actuador

$k_e$	$3 \cdot 10^3$	$(\Omega m)^{-1}$
$k_t$	50	$W/(mK)$
$T_{aire}$	300	$K$
$T_b$	300	$K$
$h$	10	$W/(m^2K)$
$\alpha$	$4 \cdot 10^{-6}$	$K^{-1}$
$E$	$1.7 \cdot 10^9$	$Pa$
$\nu$	0.3	



# Plan

- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 **Problema Resuelto**
  - Formulación del problema
  - **Ejemplo resuelto en Elmer Tutorials**
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Ejemplo resuelto en Elmer Tutorials

## Documento Elmer Tutorials

### Tutorial 14: Thermal actuator driven with electrostatic currents

## Problema resuelto

- importación de malla de ANSYS
- conductividad eléctrica dependiente de temperatura
- paredes aisladas térmicamente

# Plan

- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 **Problema Resuelto**
  - Formulación del problema
  - Ejemplo resuelto en Elmer Tutorials
  - **Resolución del problema**
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Resolución del problema

## Etapas

- importación de malla (generada con Gmsh)
- modificación de archivo `.sif` para
  - fijar nuevos datos
  - determinar nuevas condiciones de contorno
  - guardar resultados en formato `.vtk`

# Plan

- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 Problema Resuelto
  - Formulación del problema
  - Ejemplo resuelto en `Elmer Tutorials`
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Plan

- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 Problema Resuelto
  - Formulación del problema
  - Ejemplo resuelto en `Elmer Tutorials`
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Un segundo modelo del actuador

## Modelo más realista

- conductividad eléctrica dependiente de temperatura (tabla en documento `Elmer Tutorials`)
- conductividad térmica dependiente de la temperatura (tomada ajustando una función de datos del artículo)

## Modelo de elementos finitos completo

mod.eléctrico	$K_e(T_h) V_h = b_e$
mod. térmico	$K_t(T_h) T_h = b_t(V_h)$
mod. mecánico	$K_m u_h = b_m(T_h)$

# Conductividad eléctrica

Tabla de valores para la conductividad eléctrica

Temperatura	Conductividad eléctrica
298.0	4.3478e10
498.0	1.2043e10
698.0	5.1781e9
898.0	2.7582e9
1098.0	1.6684e9
1298.0	1.0981e9
1683.0	1.0
2000.0	1.0



# Conductividad térmica

Tabla de valores para la conductividad térmica

Temperatura	Conductividad térmica
300.0	146.4
400.0	98.3
500.0	73.2
600.0	57.5
700.0	49.2
800.0	41.8
900.0	37.6
1000.0	34.5
1100.0	31.4
1200.0	28.2
1300.0	27.2
1400.0	26.1
1500.0	25.1

# Resolución del segundo modelo de actuador

## Problema termo-eléctrico

mod.eléctrico  $K_e(T_h)V_h = b_e$

mod. térmico  $K_t(T_h)T_h = b_t(V_h)$

## Resolución *segregada*

Con  $V_h^0$  y  $T_h^0$  resolver hasta convergencia:

1 Calcular  $V_h^{n+1}$  en mod. eléctrico:  $K_e(T_h^n)V_h^{n+1} = b_e$

2 Calcular  $T_h^{n+1}$  en mod. térmico:  $K_t(T_h^{n+1})T_h^{n+1} = b_t(V_h^{n+1})$

# Resolución del segundo modelo de actuador

## Convergencia de cálculo en modelo no lineal

- Con no linealidad fuerte y sin estimaciones iniciales: puede aparecer dificultades de convergencia
- Con  $V_f$  reducida NO hay problemas de convergencia
- Se puede emplear continuación en parámetro tensión  $V_f$

## Sugerencias

- consúltese cómo emplear solución ya calculada como iterante inicial

# Plan

- 1 Descripción del problema
  - Un actuador microelectromecánico
  - Modelado con elementos finitos
- 2 Problema Resuelto
  - Formulación del problema
  - Ejemplo resuelto en `Elmer Tutorials`
  - Resolución del problema
- 3 Problemas Propuestos
  - Problema propuesto 1
  - Problema propuesto 2

# Construcción de curva tensión–desplazamiento

## Curva tensión aplicada – desplazamiento

- para tensiones eléctricas entre 0 y 20 voltios, representar desplazamientos verticales de un punto tomado en el extremo del actuador en función de la tensión aplicada

## Observación

Ver problema anterior acerca de método de continuación

# Construcción de curva tensión–desplazamiento (cont.)

## Corrección de curva por efectos elásticos no lineales

- calcular de nuevo la curva teniendo en cuenta ahora los efectos no lineales debidos al uso del tensor de deformaciones completo

## Observación

Sobre cálculos con elasticidad no lineal, ver el ejemplo *Loaded elastic beams* en el documento `Elmer Tutorials`.