



Manual de resolución dun problema
multifísico nun forno de indución co
paquete de software libre
ELMER

Este manual foi desenvolvido no marco dun Convenio de Colaboración entre a Xunta de Galicia, as Universidades de Coruña, Santiago de Compostela e Vigo, e a Sociedade Anónima de Xestión Centro de Supercomputación de Galicia, para o desenvolvemento do software libre na área de simulación empresarial. Ademais, este proxecto encádrase dentro da "Iniciativa Galega polo Software Libre Mancomun.org". Neste estudio de promoción da simulación numérica na industria a través da utilización de software libre participaron os seguintes investigadores:

D. Jesús Arribi Vilela. CESGA.
D. Alfredo Bermúdez de Castro e López Varela. USC.
Dona Generosa Fernández Manín. Uvigo.
Dona Ana María Ferreiro Ferreiro. UDC.
D. José Antonio García Rodríguez. UDC.
D. Andrés Gómez Tato. CESGA.
D. Marcos Meis Fernández. Uvigo.
Dona M^a Cristina Naya Riveiro. USC.
Dona Peregrina Quintela Estévez. USC.
Dona Diana Rivas Cruz. USC.
Dona María Teresa Sánchez Rúa. USC
D. Fernando Varas Mérida. UVigo.
D. Carlos Vázquez Cendón. UDC

Táboa de Contidos

1. Problema físico.....	4
2. Resolución usando GUI.....	7
2.1. Importación da malla mediante ElmerGrid.....	7
2.2. Preproceso.....	8
2.3. Proceso.....	20
2.4. Postproceso.....	24
2.5. Comparación con COMSOL.....	26
3. Resolución mediante arquivo *.sif.....	31

1. Problema físico

Os fornos de indución son fornos eléctricos utilizados para tratamentos térmicos ou na fundición de metais, especialmente ferro e aceiro, cobre, aluminio e metais preciosos, entre outros.

O quentamento por indución utiliza as propiedades do campo magnético para a transformación de enerxía eléctrica en enerxía calorífica, sen recorrer ó contacto directo.

A calor precisa para o tratamento térmico ou a fundición do material prodúcese cando se fai circular unha corrente eléctrica por un medio condutor, por exemplo unha bobina, xerando un campo electromagnético ó seu redor, que orixina o quecemento do material condutor, situado no interior da bobina, por medio de correntes parásitas, *correntes de Foucault*. A calor que se xera recibe o nome de *Efecto Joule*.

O material a tratar ou a fundir introdúcese nun crisol, xeralmente de grafito, que se sitúa no interior da bobina e recóbrese dun material illante para permitir unha maior potencia do forno. Este aumento de potencia é permitido sempre que as cargas de orixe térmica non provoquen rotura ou fisura do crisol ou da capa de illante.

Este manual pretende pór de manifesto as capacidades multifísicas de Elmer, é dicir, a capacidade de Elmer para resolver varias ecuacións acopladas entre sí e definidas sobre distintos dominios con diferentes propiedades físicas.

Na figura 1.1a pódese ver unha sección da xeometría do problema considerado. Así, neste exemplo considérase en primeiro lugar o campo electromagnético xerado pola corrente alterna que é conducida a través da bobina. No cálculo deste campo magnético será preciso resolver un problema electromagnético sobre toda a xeometría (como se verá, grazas á simetría de revolución do forno, á hipótese de que as correntes eléctricas só teñen compoñentes acimutais e á hipótese de baixas frecuencias, poderase empregar unha simplificación das ecuacións de Maxwell), cunhas condicións de contorno na fronteira que simulen o comportamento do campo magnético moi lonxe do forno (na práctica tomarase un dominio suficientemente grande e fíxase un potencial magnético nulo na fronteira, sendo preciso verificar que esta condición non produce erros importantes no campo magnético no crisol). Débese ter en conta que o problema magnético pode ser resolto de modo desacoplado do resto do problema sempre que as propiedades electromagnéticas non dependan da temperatura (que será o que se faga neste exemplo por simplicidade).

Por outra banda cómpre resolver un problema térmico xa que as correntes eléctricas que circulan polos elementos condutores (bobina, crisol, illante e material en po que se desexa fundir) producen unha disipación de calor debido ó *efecto Joule*. Estas correntes teñen unha compoñente forzada e outra parásita na bobina, sendo debidas no resto dos condutores unicamente ás correntes parásitas (ou *correntes de Foucault*) xeradas polo campo magnético. Deste xeito sobre os materiais condutores deberase resolver un problema térmico. De novo por razóns de simplicidade exclúese do problema térmico a bobina e resólvese o problema térmico exclusivamente no conxunto formado polo crisol, o illante e mailo material en po. Na fronteira deste conxunto producirase unha convección térmica ó ambiente (onde se suporá coñecido o coeficiente de convección e a temperatura ambiente).

Finalmente, debe considerarse o problema mecánico das tensións orixinadas no crisol e no illante

pola dilatación térmica (neste problema non se inclúe o material a procesar xa que está en forma de po). Para este problema mecánico suporase que o material illante atópase simplemente apoiado, e que o conxunto non está sometido a ningún esforzo adicional.

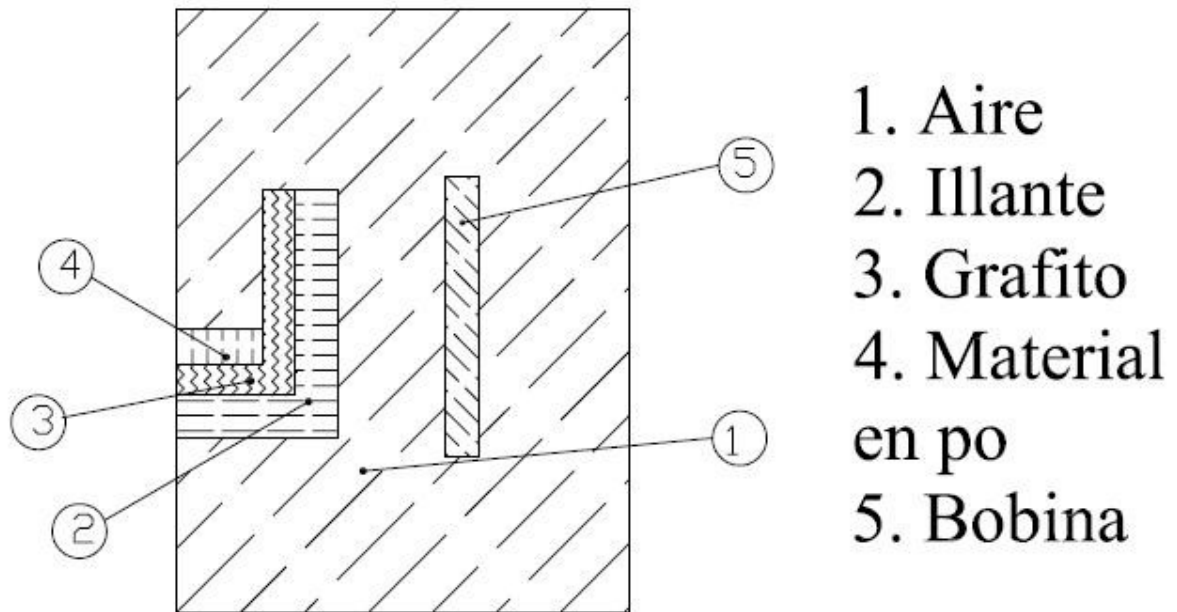


Figura 1.1a. Xeometría e subdominios do problema

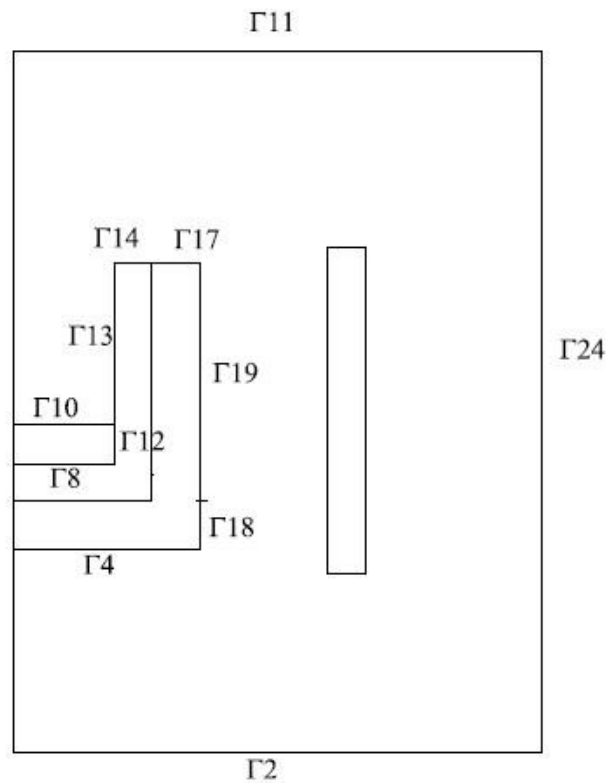


Figura 1.1b. Xeometría e etiquetas das fronteiras

Por motivos de simplificación, considérase unha xeometría 2D axisimétrica do sistema e considérase a bobina como un rectángulo cunha determinada superficie (que é percorrida por unha densidade de corrente forzada). O crisol está feito de grafito, o illamento é unha cerámica e o material a fundir está en po. As propiedades dos materiais pódense visualizar na táboa 1.1. Hai que destacar que o valor da condutividade eléctrica da bobina é ficticia (valor constante e igual a 1) debido a que posteriormente quérese comparar os resultados con COMSOL e en COMSOL non se pode impoñer unha corrente total. A frecuencia de indución é de 50 kHz mentres que a densidade de corrente é de $3 \cdot 10^5$ A/m².

Propiedades físicas	Aire	Illamento	Grafito	Material en po	Bobina
Condutividade Eléctrica [S/m]	0	$1 \cdot 10^{-8}$	$8,3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4$	1
Densidade [Kg/m ³]		2500	2200	1	
Condutividade Térmica [W/(m·K)]		16	160	0,1	
Coef. de expansión Térmica [1/K]		$3 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$		
Módulo de Young		$170 \cdot 10^{11}$	$34 \cdot 10^9$		
Coef. de Poisson		0,27	0,3		

Táboa 1.1. Valores dos parámetros físicos dos materiais

O sistema de ecuacións en derivadas parciais (modelo) que se aplica é o seguinte:

- Para o submodelo electromagnético tense

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu}\text{rot}A_{\phi}\right) + i\omega\sigma_e A_{\phi} = j_{\phi} \quad \text{en } \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \Omega_4 \cup \Omega_5$$

$$A_{\phi} = 0 \quad \text{en } \Gamma_2 \cup \Gamma_{11} \cup \Gamma_{24}$$

onde A_{ϕ} é a compoñente acimutal do potencial magnético (é unha función complexa que Elmer descompón en *Potential 1* para a parte real e *Potential 2* para a parte imaxinaria) e representa a incógnita a resolver, μ a permeabilidade magnética do material (por simplicidade considérase o valor do aire), σ_e a condutividade eléctrica, ω a frecuencia e j_{ϕ} a densidade de corrente forzada. A condición de contorno a impoñer nas fronteiras exteriores é que a compoñente azimutal do potencial magnético sexa igual a cero (hai que impoñer esta condición sobre a parte real e a parte imaxinaria).

Esta ecuación resólvese sobre todo o dominio xeométrico (os subíndices dos dominios e fronteiras corresponden cos números asignados nas figuras 1.1a e 1.1b).

- Para o submodelo térmico resólvese

$$-div(k\nabla T) = \frac{1}{2}\sigma_e\omega^2|A_\phi|^2 \quad \text{en } \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \Omega_4$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h(T - T_{ref}) \quad \text{en } \Gamma_4 \cup \Gamma_{10} \cup \Gamma_{13} \cup \Gamma_{14} \cup \Gamma_{17} \cup \Gamma_{18} \cup \Gamma_{19}$$

onde T é a temperatura e representa a variable a calcular, k é a condutividade térmica e o termo do segundo membro é a expresión que describe o efecto Joule. A condición de contorno sobre as fronteiras é unha convección térmica ó ambiente, na cal h é o coeficiente de convección e T_{ref} é a temperatura ambiente.

Esta ecuación é resolta unicamente sobre os subdominios do illante, do crisol e do material en po a tratar termicamente (de novo os subíndices dos dominios e fronteiras corresponden cos números asignados nas figuras 1.1a e 1.1b).

- Para o submodelo mecánico debe resolverse

$$-div(\sigma) = \rho\alpha(T - T_{ref}) \quad \text{en } \Omega_2 \cup \Omega_3$$

$$\sigma \mathbf{n} = 0 \quad \text{en } \Gamma_8 \cup \Gamma_{12} \cup \Gamma_{13} \cup \Gamma_{14} \cup \Gamma_{17} \cup \Gamma_{18} \cup \Gamma_{19}$$

$$\sigma_{2r} = 0 \quad \text{en } \Gamma_4$$

$$u_z = 0 \quad \text{en } \Gamma_4$$

onde σ é o tensor de tensións e \bar{u} son os desprazamentos, ρ é a densidade, α é o coeficiente de expansión térmica, T é a temperatura e T_{ref} a temperatura de referencia. Ademais, sobre a fronteira coa etiqueta Γ_4 , que corresponde ó apoio do material illante, presenta unha restrición sobre o desprazamento vertical.

Esta ecuación é resolta unicamente sobre os subdominios do illante e do crisol (dominios 2 e 3 na figura 1.1a).

Resumindo, o problema resólvese obtendo primeiro o vector potencial magnético, para poder calcular o efecto Joule, que se utiliza como termo fonte na ecuación da calor e calcular o campo de temperaturas. A distribución de temperaturas é entón utilizada como unha carga para a análise elástica (debido a fenómenos de dilatación) que calcula a deformación da estrutura que soporta o material a tratar termicamente.

Como se pode observar, neste exemplo non se resolve o quentamento por radiación (fenómeno moi importante na transferencia da calor global) para evitar unha definición dun problema máis complicado, aínda que Elmer pode calcular a calor por radiación a través da ecuación da enerxía utilizando un módulo adicional para calcular os factores de visión das superficies.

2. Resolución usando GUI

2.1. Importación da malla mediante ElmerGrid

NOTA: Tódolos arquivos necesarios para realizaren a simulación e visualización deste exemplo están dispoñíbeis no cartafol `multifisica/exemplos/forno` do CD. É recomendable que o usuario copie os arquivos necesarios (arquivos de malla e arquivos auxiliares) do CD ó cartafol no cal realizará a simulación.

As capacidades de mallado do programa Elmer son moi limitadas pero incorpora a posibilidade de importar unha xeometría CAD ou unha malla feita por outros programas, algúns comerciais e outros de software libre. Neste caso a malla foi creada utilizando o programa comercial COMSOL Multiphysics, e foi importada ó formato Elmer mediante o uso da aplicación **ElmerGrid**. Os pasos para realizar a importación da malla son os seguintes:

- Copia-la malla que define a xeometría, *malla_forno.mphtxt* (incluída no CD *.../multifisica/exemplos/forno/*), a un cartafol chamado *.../Forno/*. Para crealo débese escribir

```
$ mkdir ~/Forno
```

e para copia-lo arquivo da malla

```
$ cp /media/softlibre_ELMER/multifisica/exemplos/forno/malla_forno.mphtxt ~/Forno/
```

- Converter a malla mediante ElmerGrid usando o seguinte comando

```
$ ElmerGrid 9 2 malla_forno.mphtxt -increase -autoclean
```

que ademais de converter a malla ó formato Elmer incrementa a orde dos elementos empregados de lineal a cuadrático.

- Copiar os arquivos resultantes (*mesh.header*, *mesh.boundary*, *mesh.elements* e *mesh.nodes*) ó seguinte directorio *.../Forno/MESHDIR/malla/*. Para crea-los cartafoles debe escribirse na liña de comando

```
$ mkdir ~/Forno/MESHDIR ~/Forno/MESHDIR/malla
```

mentres que para copia-los arquivos da malla é necesario escribir

```
$ cp ~/Forno/malla_forno/* ~/Forno/MESHDIR/malla/
```

2.2. Preproceso

O primeiro paso é lanzar Elmer no directorio desexado (mediante o comando ElmerFront ou usando os menús do escritorio ou a correspondente icona se está dispoñíbel na plataforma utilizada). Mediante a liña de comando

```
$ ElmerFront
```

A figura 2.1 mostra a imaxe do entorno de usuario.

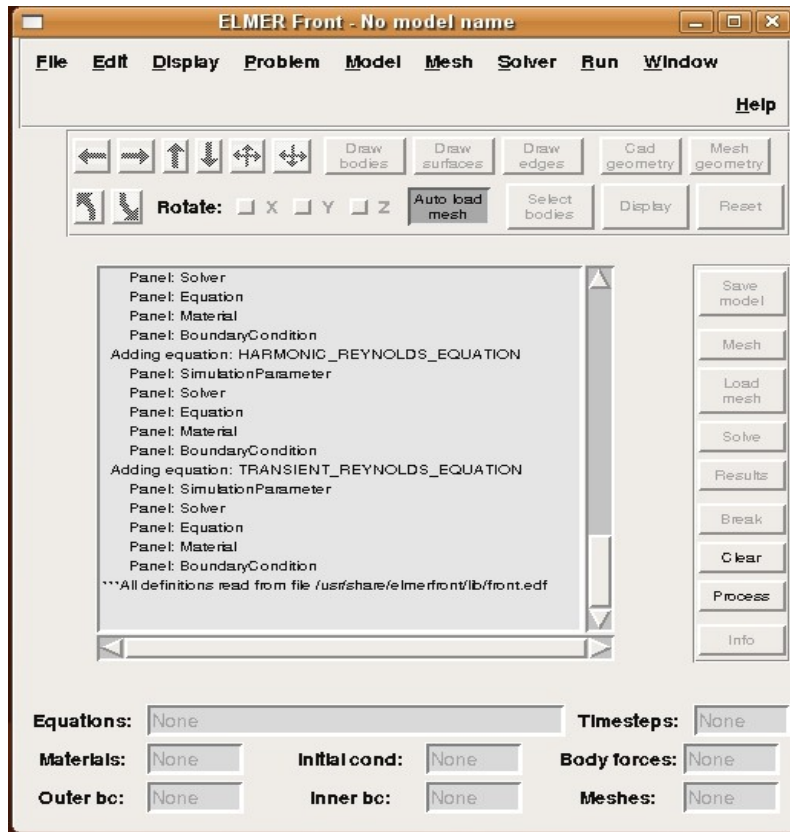


Figura 2.1. Entorno de usuario do programa

As definicións dos paneis e ventás que carga por defecto ElmerFront non conteñen os campos necesarios para realiza-la simulación exposta neste exemplo. Entón é necesario le-lo arquivo de definición que permite modifica-los paneis que o entorno de usuario nos ofrecerá no problema mecánico e máis no problema magnético. Para cargar o arquivo *Front_forno.edf* que modifica o GUI de **ElmerFront** débese elixir dende o menú *File*

File -> Load definition file...->Front_forno.edf

A continuación abri-lo arquivo (arquivo *mesh.header*) que contén a información da malla que describe a xeometría do problema dende o menú *File*

File ->Open mesh File

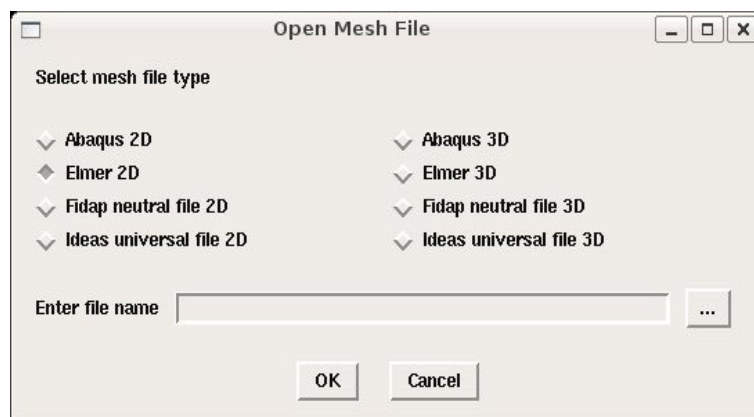


Figura 2.2. Fiestra ler malla

Na fiestra gráfica *Open Mesh Files* (figura 2.2), déixase activa a opción lóxica de Elmer *2D* e escríbese, si se coñece, a ruta do arquivo mesh.header que contén a definición da malla ou ben selecciónase a ruta a partir da fiestra gráfica que se obtén ó facer clic no botón con puntos suspensivos. Finalmente, púlsase o botón OK.

NOTA: Antes de nada, recoméndase pechar, premendo o botón Cancel, a fiestra *Model names and directories* que se carga automaticamente, pois temos detectado algún problema, en concreto unha nova conversión da malla, si se incorpora eiquí a información.

Debido á configuración que presenta *ElmerFront*, a malla é cargada automaticamente e ábrese unha fiestra gráfica (figura 2.3) na que se poden visualizar, por medio das liñas de cores, os diferentes subdominios que presenta a xeometría. Para visualiza-la malla é necesario desactiva-lo botón *Draw bodies*.

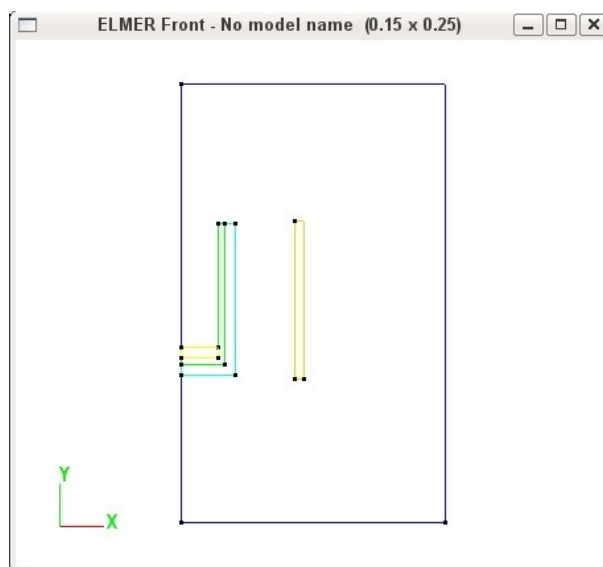


Figura 2.3. Fiestra gráfica de visualización

Neste exemplo tense que resolver distintos problemas nos diferentes subdominios así que recomendamos etiquetalos con nomes fáciles de recoñecer e non cos que poría Elmer por defecto.

Primeiro, para identificalos pódese usar *Display-> Display bodies*.

Unha vez identificados os subdominios, o proceso para cambia-las etiquetas dos nomes é o seguinte:

- Abri-la ventá gráfica de Bodies (figura 2.4) dende **Edit-> Bodies...**
- Seleccionar cada subdominio, cambia-lo nome e preme-la tecla **return** despois de cada un (se se preme o botón **Apply**, é necesario elexir unha cor para que Elmer garde o cambio de nome).

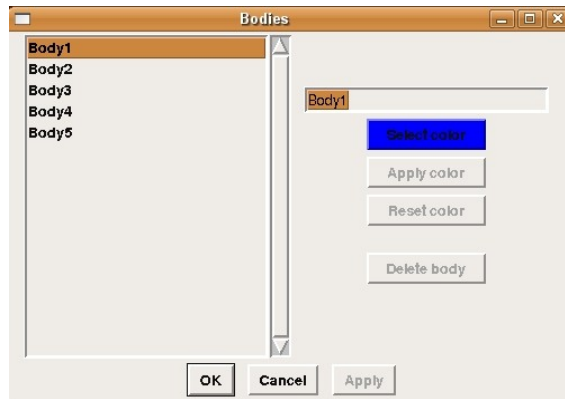


Figura 2.4. Fiestra gráfica das etiquetas dos subdominios

Coa nosa asignación por defecto nomeamos do seguinte xeito:

- Body1 = Aire**
- Body2 = Illante**
- Body3 = Grafito**
- Body4 = Material en po**
- Body5 = Bobina**

- Unha vez etiquetados os 5 subdominios púlsase o botón OK.

A continuación débese establecer o nome e o directorio de traballo para que Elmer poida gardar o modelo. Para iso, é necesario abrir a fiestra (figura 2.5) a través do menú *Problem*

Problem-> Model names and directories...

É obrigatorio dar o nome do modelo (*Model name*) e a ruta do directorio (*Model Directory*)

- Model name = Forno**
- Problem name = multifisico**
- Model directory = .../Forno**

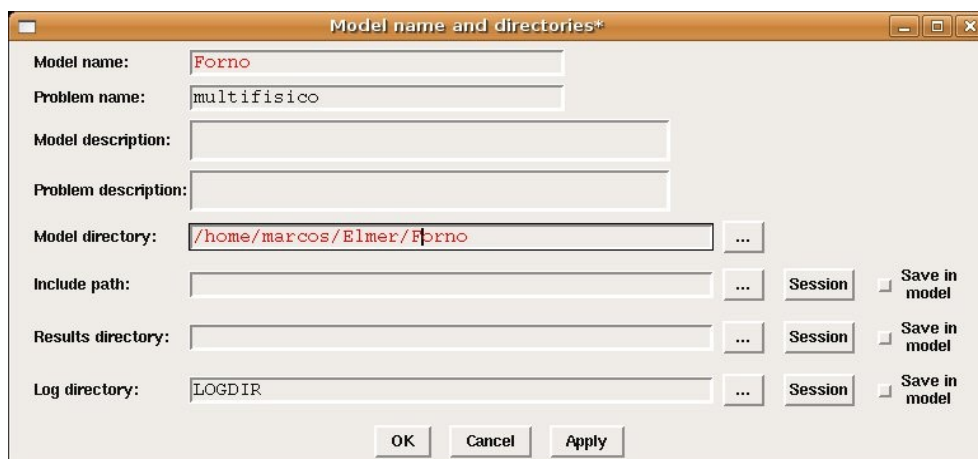


Figura 2.5. Fiestra gráfica do nome e directorio do modelo

para rematar facer clic en OK .

O seguinte paso é fixar o sistema de coordenadas 2D como axisimétrico dende o menú *Problem*, para que a continuación se poidan definir as ecuacións, as forzas distribuídas e demais parámetros

Problem-> Coordinate settings...



Figura 2.6. Fiestra gráfica das opcións do sistema de coordenadas

Para elo é necesario activa-la opción lóxica *AxiSymmetric* e facer clic en OK na fiestra gráfica das opcións das coordenadas (figura 2.6).

A selección das ecuacións a resolver sobre cada un dos subdominios realízase dende o menú *Problem*

Problem-> Equations...

Neste caso, hai que resolver tres ecuacións sobre diferentes subdominios. O proceso de asignación de cada unha das ecuacións ós diferentes subdominios é o seguinte:

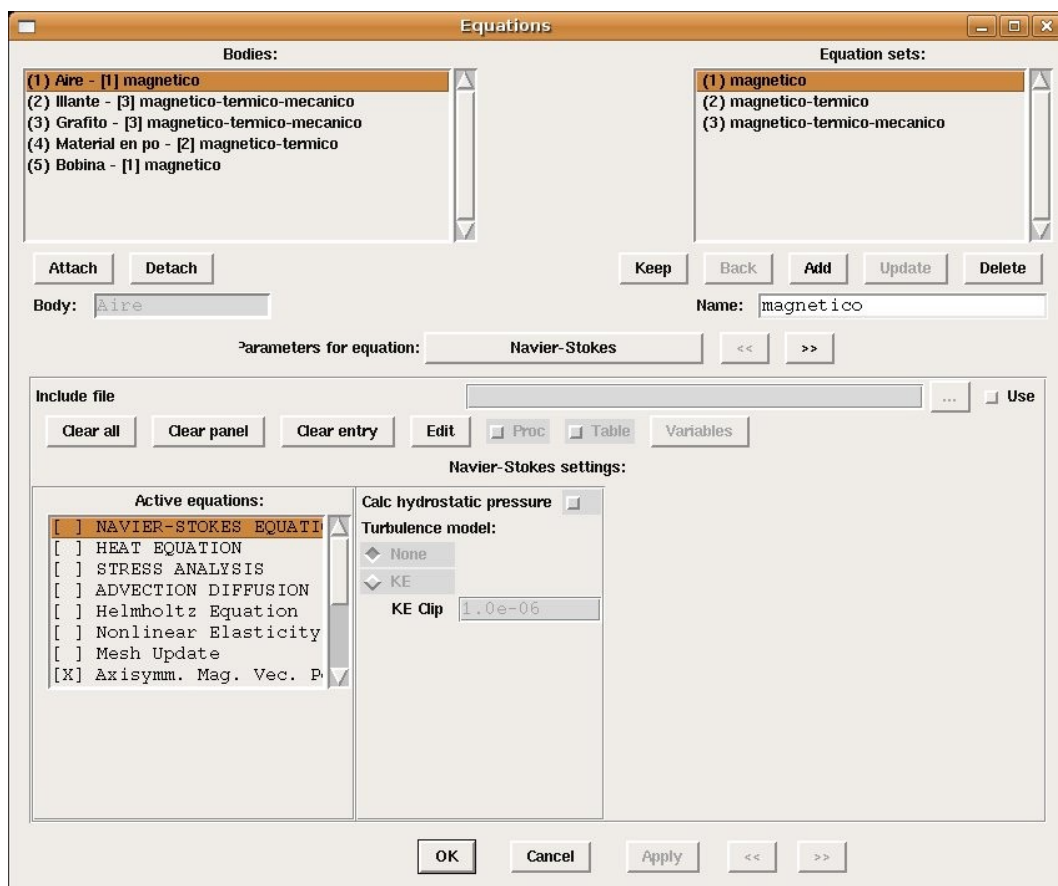


Figura 2.7. Fiestra gráfica das ecuacións

Para defini-lo modelo sobre o aire e maila bobina:

- Selecciona-los subdominios **Aire** e **Bobina** (utilizar a tecla *Ctrl*) na fiestra Bodies:
- Selecciona-la ecuación **Axisymm. Mag. Vec. Pot.** da fiestra **Active equations**:
- Escribir *Magnetico* no campo **Name**:
- Facer clic no botón Add

Para defini-lo modelo sobre o material en po

- Selecciona-lo subdominio **Material en po** na fiestra Bodies:
- Selecciona-las ecuacións **Axisymm. Mag. Vec. Pot.** e **HEAT EQUATION** da fiestra **Active equations**:
- Escribir *Magnetico-termico* no campo **Name**:
- Facer clic no botón Add

Para defini-lo modelo sobre o illante e o grafito

- Selecciona-los subdominios **Illante** e **Grafito** (utilizar a tecla *Ctrl*) na fiestra Bodies:
- Selecciona-las ecuacións **Axisymm. Mag. Vec. Pot.**, **HEAT EQUATION** e **STRESS ANALYSIS** da fiestra **Active equations**:
- Escribir *Magnetico-termico-mecanico* no campo **Name**:
- Facer clic no botón Add
- Facer clic no botón OK

A figura 2.7 mostra unha imaxe da ventá das ecuacións unha vez realizado todo o proceso de asignación.

O proceso de resolución debe seguir unha orde determinado, debido os acoplamentos entre os diversos modelos. A orde de resolución dos modelos establécese a través da ventá gráfica que surxe da selección de

Problem-> Equation solving order...

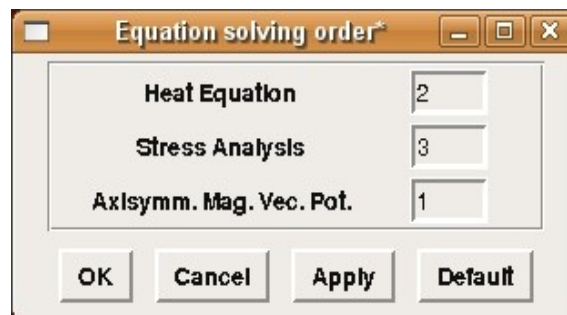


Figura 2.8. Fiestra gráfica da orde de resolución das ecuacións

A orde a elixir (que xa foi descrita na definición do problema físico) é a seguinte (ver figura 2.8):

Heat Equation = 2

Stress Analysis = 3

Axisymm. Mag. Vec. Pot. = 1

Como sempre para pechar a fiestra púlsase o botón OK.

Aínda que neste exemplo non é necesario, pois o problema é estático lineal e ademais o resolveremos cun método directo, imos especificar como se introducirían as condicións iniciais (que se empregarían ademais como iterante iniciais) para a ecuación da calor. Así, dende o menú *Model* elíxese

Model-> Initial conditions...

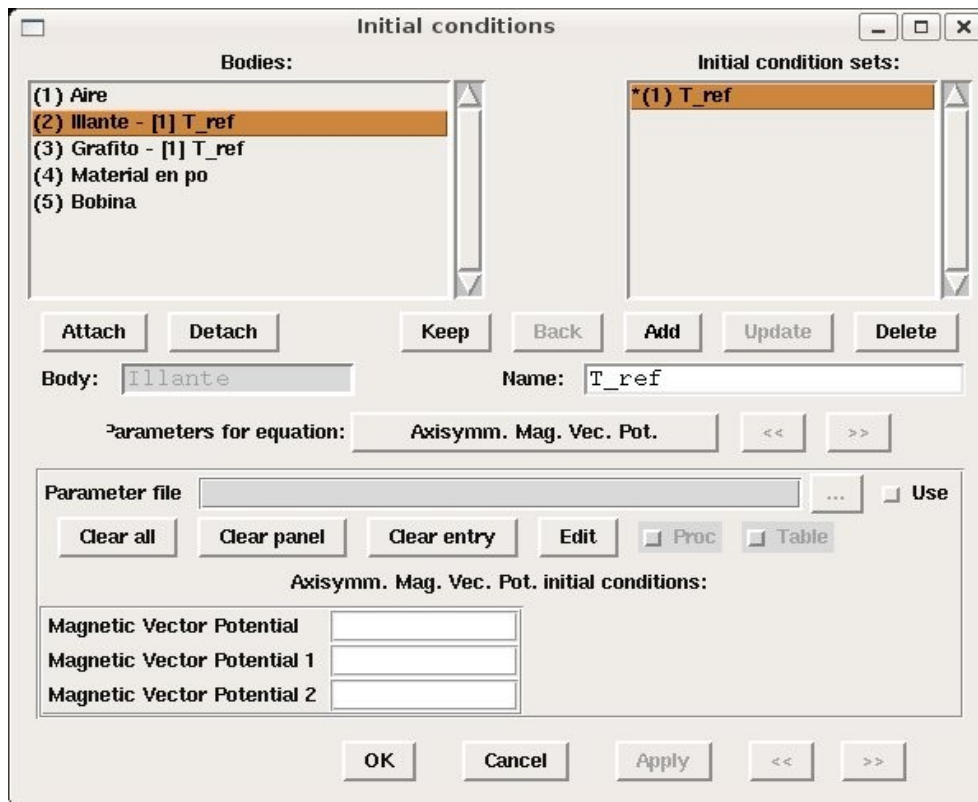


Figura 2.9. Fiestra gráfica das condicións iniciais

O proceso a seguir para especificar as condicións iniciais para o problema térmico sobre o illante e mai-lo grafito é o seguinte (ver figura 2.9):

- Selecciona-los subdominios **Illante** e **Grafito** (utilizar a tecla *Ctrl*) na fiestra Bodies:
- Selecciona-la opción lóxica Heat Equation no menú desplegable **Parameters for equation**:
- Introduci-lo valor da condición inicial, 293 nesta caso, no campo Temperature[K]
- Escribir T_{ref} no campo Name:
- Facer clic no botón Add
- E facer clic no botón OK

A especificación das forzas distribuídas para cada un dos subdominios (de se-lo caso) realízase dende o menú *Model*

Model-> Body forces...

e móstrase a ventá gráfica (figura 2.10).

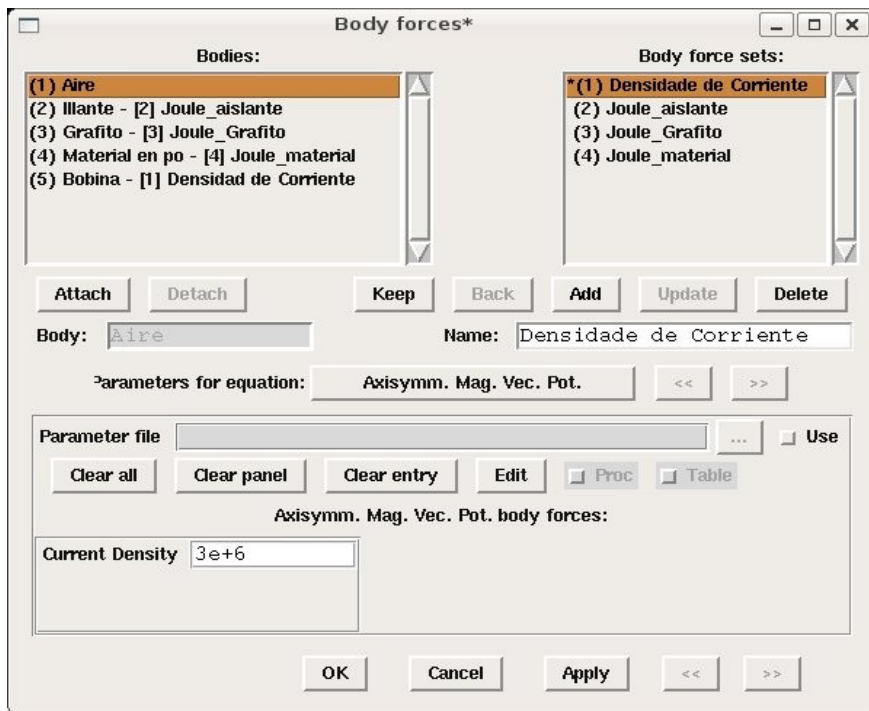


Figura 2.10. Fiestra gráfica das forzas distribuídas

O método a seguir para introduci-los parámetros das forzas distribuídas neste exemplo é o seguinte:

Para introduci-las forzas distribuídas no problema electromagnético (correntes forzadas):

- Selecciona-los subdominios **Bobina** na fiestra Bodies:
- Introduci-lo valor $3e+6$ no campo **Current Density**
- Escribir *Densidade de corrente* no campo **Name**:
- Facer clic no botón Add

Para introduci-las forzas distribuídas no problema térmico (efecto Joule) é necesario facelo a través de arquivos. Estes arquivos conteñen as palabras chave para especifica-lo efecto Joule como forza distribuída da ecuación da calor para tódolos dominios. Hai que ter en conta que a forza distribuída a especificar na ecuación da calor é o resultado de multiplicar a densidade pola fonte térmica, razón pola cal hai que dividir o efecto Joule entre a densidade do material correspondente.

Nota: O conxunto de palabras chave e valores asociados neste arquivo é o seguinte:

$$\text{Heat Source} = \text{Variable Joule Field} \\ \text{MATC } \text{"cond*tx/dens"}$$

onde *cond* é condutividade eléctrica do material, *dens* é a densidade do material e Joule Field (representado na formula como *tx*) representa o quentamento cando se multiplica pola condutividade eléctrica (é necesario usar esta variable porque a condutividade eléctrica é descontinua dando lugar a unha enerxía de quencemento descontinua). Esta nota tamén é válida para os demais materiais onde se definen o efecto Joule.

- Selecciona-lo subdominio **Illante** na fiestra Bodies:
- Seleccionar Heat Equation no menú desplegable de **Parameters for equation**:
- Activa-la opción lóxica **Use** e escribir a ruta (ou buscala co botón ...) do arquivo

Efecto_Joule_illante (.../Forno/Efecto_Joule_illante) na sección de **Parameter file**.

- Escribir *Joule_illante* no campo **Name**:
- Facer clic no botón Add

- Selecciona-lo subdominio **Grafito** na fiestra Bodies: e coa mesma ecuación do calor activar a opción lóxica **Use** e escribi-la ruta do arquivo *Efecto_Joule_grafito* ou selecciónalo mediante o uso do botón ... (.../Forno/Efecto_Joule_grafito) na sección de **Parameter file**. Este arquivo contén a información que especifica o efecto Joule no grafito.
- Escribir *Joule_grafito* no campo **Name**:
- Facer clic no botón Add

- Seleccionar o subdominio **Material en po** na fiestra Bodies: e coa mesma ecuación da calor activar **Use** e escribir ou buscar a ruta do arquivo *Efecto_Joule_material* (.../Forno/Efecto_Joule_material_po) na sección de **Parameter file**. Ó igual que nos casos anteriores, este arquivo contén a información do efecto Joule, pero neste caso para o material en po.
- Escribir *Joule_material* no campo **Name**:
- Facer clic no botón Add
- Facer clic no botón OK

NOTA: Observar que o problema mecánico tamén ten unha forza distribuída, as tensión térmicas debidas as dilatacións dos materiais, pero esta forza especificase mediante as propiedades mecánica e mai-la temperatura de referencia.

De seguido imos engadir os parámetros físicos requiridos por cada problema e para cada un dos materiais dende o menú Model

Model-> Materials...

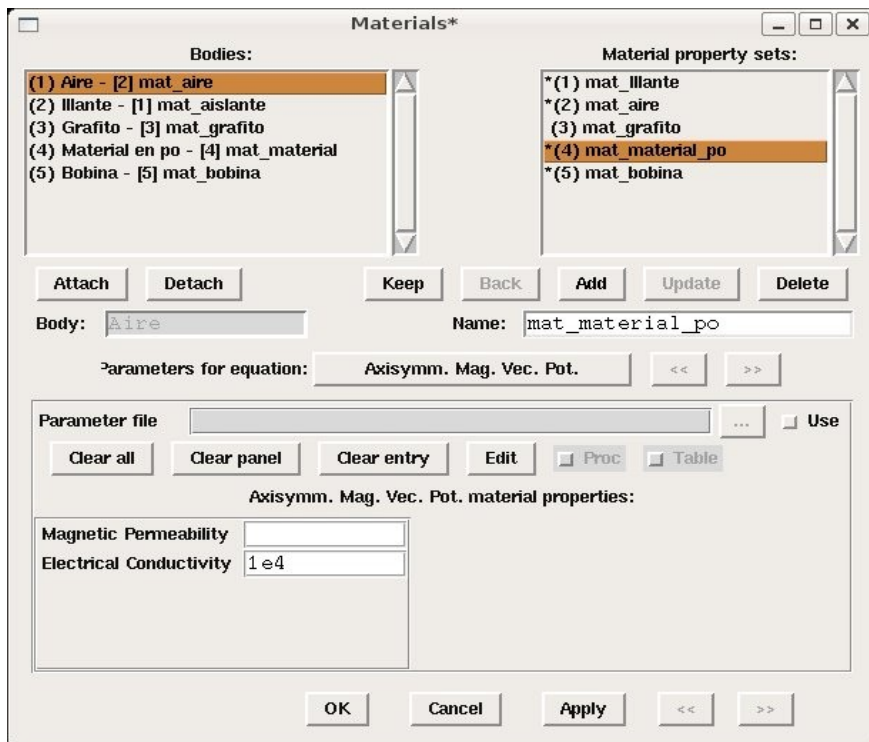


Figura 2.11. Fiestra gráfica dos materiais

Para o submodelo electromagnético é necesario especificar o valor da permeabilidade do medio pero, por simplicidade, tomouse o valor por defecto (a permeabilidade do baleiro), razón pola cal non é necesario utilizar a palabra chave e o seu valor asociado en cada material.

Neste caso soamente se describen os pasos a seguir para introduci-los parámetros físicos do subdominio do **Illante** (ver figura 2.11), xa que a introdución dos parámetros nos outros subdominios realízase do mesmo xeito.

- Selecciona-lo subdominio **Illante** na fiestra Bodies:
- Introduci-lo valor de $1 \cdot 10^{-8}$ no campo **Electrical Conductivity**
- Selecciona-la opción lóxica Heat Equation no menú desplegable **Parameters for equation:**
- Introduci-lo valor *2500* no campo **Density [Kg/m3]**
- Introduci-lo valor *16* en **Heat Conductivity [W/mK]**
- Seleccionar a opción lóxica Stress analysis no menú desplegable **Parameters for equation:**
- Introduci-lo valor $3 \cdot 10^{-6}$ en **Heat expansion coeff. [1/K]**
- Introduci-lo valor *293* en **Reference temperature [K]**
- Introduci-lo valor $170 \cdot 10^{11}$ en **Young 's modulus**
- Introduci-lo valor *0,27* en **Poisson coeff.**
- Escribir *mat_Illante* no campo Name:
- Facer clic no botón Add

Os parámetros dos demais subdominios son os seguintes:

- No Aire, onde se resolve o problema magnético
Condutividade eléctrica = 0
mat_aire no campo Name:
- No Grafito, para o problema magnético
Condutividade eléctrica = $8,3 \cdot 10^5$
para o térmico
Densidade = 2200
Condutividade térmica = 160
para o problema mecánico
Coef. de expansión térmica = $8 \cdot 10^{-6}$
Temperatura de referencia = 293
Módulo de Young = $34 \cdot 10^9$
Coef. Poisson = 0,3
mat_grafito no campo Name:
- No Material en po, para o problema magnético
Condutividade eléctrica = $1 \cdot 10^4$
para o térmico
Densidade = 1
Condutividade térmica = 0,1
mat_material_po no campo Name:
- Na Bobina, na que se resolve o problema magnético
Condutividade eléctrica = 1
mat_bobina no campo Name:

Unha vez introducidos tódolos datos, púlsase o botón OK.

Para impoñer-las condicións de contorno (definidas ó inicio deste manual) recoméndase que previamente se visualicen e se tome nota das etiquetas asignadas (tamén sería posible asignarlles nomes tal e como se fixo cos subdominios usando **edit->boundaries**) mediante **Display-> Display boundaries**.

As condicións de contorno en cada un dos problemas especificanse mediante a ventá gráfica que se obtén dende o menú

Model-> Boundary condition...

e os pasos a seguir para establecela son os seguintes (ver figura 2.12):

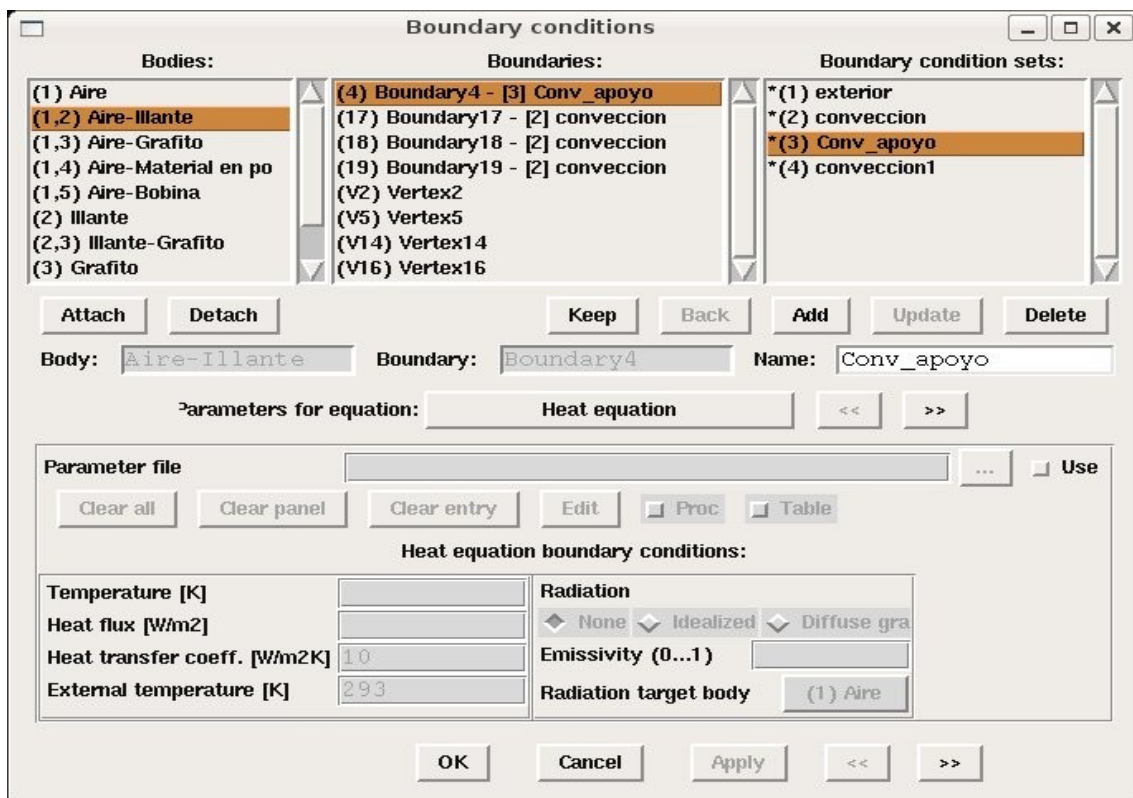


Figura 2.12. Fiestra gráfica das condicións de contorno

Para as condicións de contorno sobre a fronteira exterior:

- Selecciona-lo subdominio **Aire** na fiestra Bodies:
- Selecciona-las fronteiras **Boundary2**, **Boundary11** e **Boundary24** (utilizar a tecla *Ctrl*) no campo Boundaries:
- Introduci-lo valor 0 no campo de **Magnetic Vector Potential1**
- Introduci-lo valor 0 no campo de **Magnetic Vector Potential2**
- Escribir *Externo* no campo **Name**:
- Facer clic no botón Add

Para as condicións de contorno sobre as fronteiras comúns o aire e o illante:

- Selecciona-lo subdominio **Aire-Illante** na fiestra Bodies:
- Selecciona-las fronteiras **Boundary17**, **Boundary18** e **Boundary19** (utilizar a tecla *Ctrl*) no campo Boundaries:
- Selecciona-la opción lóxica Heat Equation no menú desplegable **Parameters for equation:**
- Introduci-lo valor *10* en **Heat transfer coeff. [W/m2K]**
- Introduci-lo valor *293* en **External Temperature [K]**
- Escribir *Conveccion* no campo **Name:**
- Facer clic no botón Add

Para as condicións de contorno sobre as fronteiras comúns o aire e o grafito:

- Selecciona-lo subdominio **Aire-Grafito** na fiestra Bodies:
- Selecciona-las fronteiras **Boundary13** e **Boundary14** (utilizar a tecla *Ctrl*) no campo Boundaries:
- Selecciona-la condición *conveccion* xa fixada na fiestra **Boundary conditions sets:**
- Facer clic no botón Attach

Para as condicións de contorno sobre as fronteiras comúns o aire e o material en po:

- Selecciona-lo subdominio **Aire-Material en po** na fiestra Bodies:
- Selecciona-las fronteiras **Boundary10** no campo Boundaries:
- Introduci-lo valor *10* en **Heat transfer coeff. [W/m2K]**
- Introduci-lo valor *293* en **External Temperature [K]**
- Escribir *Conveccion1* no campo **Name:** (neste caso aínda que os datos da condición de fronteira son os mesmos que nas fronteiras anteriores debemos crear unha condición nova pois os modelos que se resolven nos subdominios son distintos).
- Facer clic no botón Add

Para as condicións de contorno sobre as fronteiras comúns o aire e o illante:

- Seleccionar **Aire-Illante** na fiestra de Bodies: e a fronteira **Boundary4** no campo Boundaries:
- Selecciona-la opción Heat Equation no menú desplegable **Parameters for equation:**
- Introduci-lo valor *10* en **Heat transfer coeff. [W/m2K]**
- Introduci-lo valor *293* en **External Temperature [K]**
- Seleccionar a opción lóxica Stress Analysis no menú desplegable **Parameters for equation:**
- Introduci-lo valor *0* en **Displacement-Z [m]**
- Escribir *Conv_apoio* no campo **Name:**
- Facer clic no botón Add
- Facer clic no botón OK

A continuación débese etiquetar a malla mediante o menú

Mesh-> Define mesh...

Hai que ter un coidado especial co nome que se lle asigna a malla na ventá gráfica da figura 2.13. O nome (etiqueta) da malla ten que coincidir co nome do subdirectorio onde está o arquivo da malla.

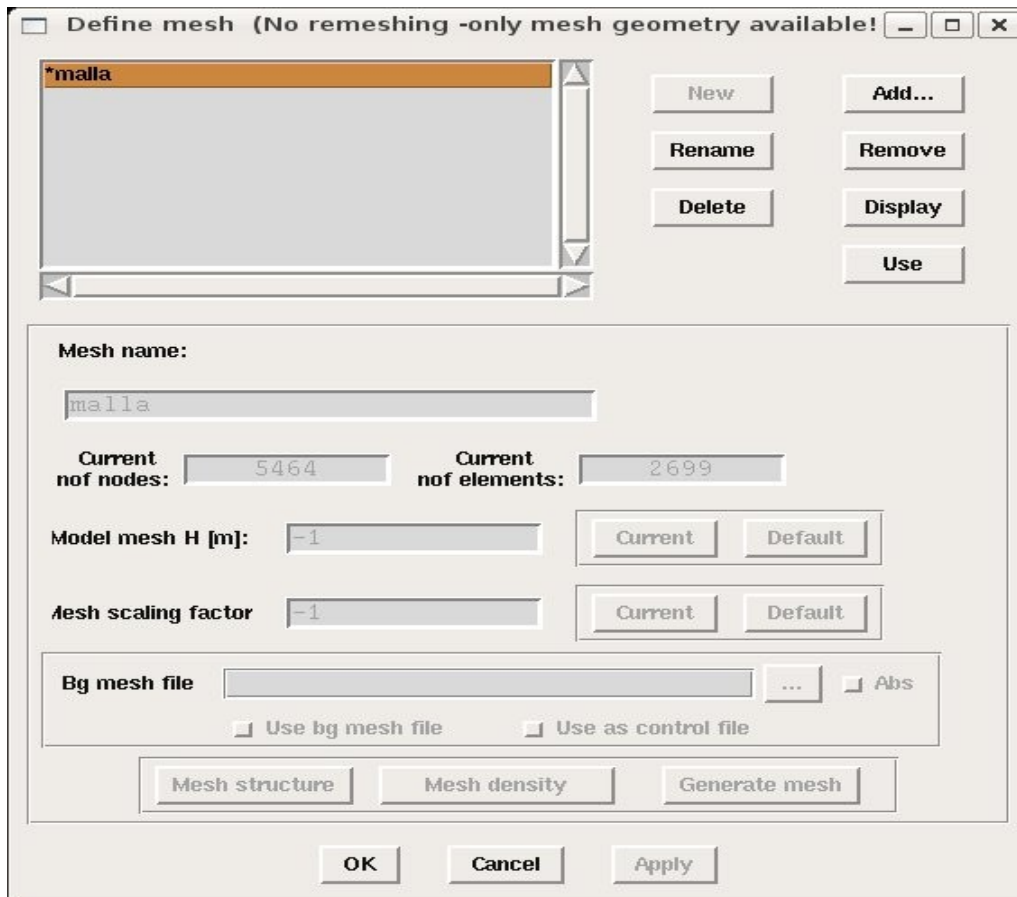


Figura 2.13. Fiestra gráfica de definición da malla

Nesta ventá soamente hai que escribir o nome da malla no campo **Mesh name:**, neste caso **malla**.

Para pecha-la fiestra, hai que facer clic no botón OK

2.3. Proceso

Imos agora especificar os parámetros de resolución para as tres ecuacións dende o menú Solver, elixindo

Solver -> Solver settings

o que permite acceder á fiestra da figura 2.14.

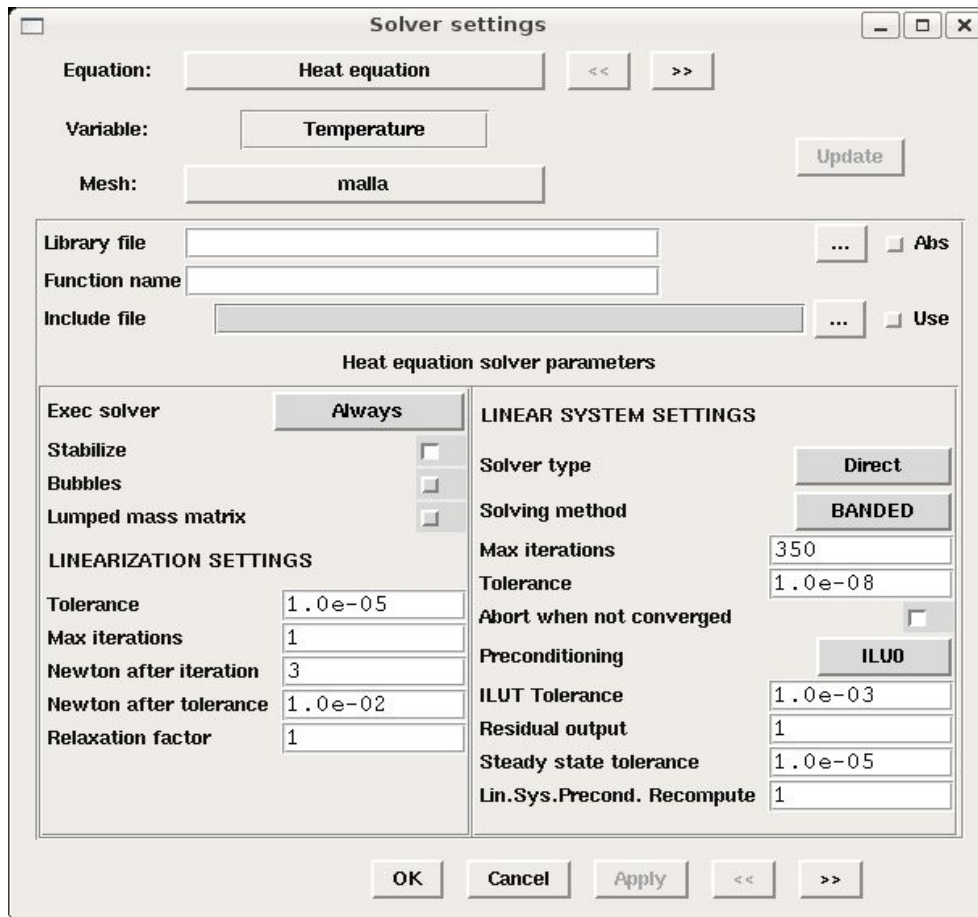


Figura 2.14. Fiestra gráfica das opcións de resolución

Os pasos son:

- Seleccionar, usando as frechas que aparecen ó lado do nome do problema (**Equation:**), a opción Axysimm. Mag. Vec. Pot.
- Introduci-lo valor $50 \cdot 10^3$ en **Angular Frequency**
- Seleccionar a opción **Direct** no menú desplegable **Solver type** na fiestra da dereita
- Facer clic no botón Update
- Seleccionar o problema Heat equation usando as frechas:
- Seleccionar de novo **Direct** no menú desplegable de **Solver type** na fiestra da dereita
- Facer clic no botón Update
- Seleccionar o problema Stress Analisys usando as frechas:
- Seleccionar **Direct** no menú desplegable **Solver type** na fiestra da dereita
- Facer clic no botón Update
- Facer clic no botón OK

Por último debemos especifica-lo número máximo de iteracións en estacionario (é dicir, o número de veces que se iteraría entre os diferentes solvers si o problema estivese acoplado, o que neste exemplo non será preciso polo que o número que se pon é 1), mediante o menú Problem

Problem-> Timestep settings...

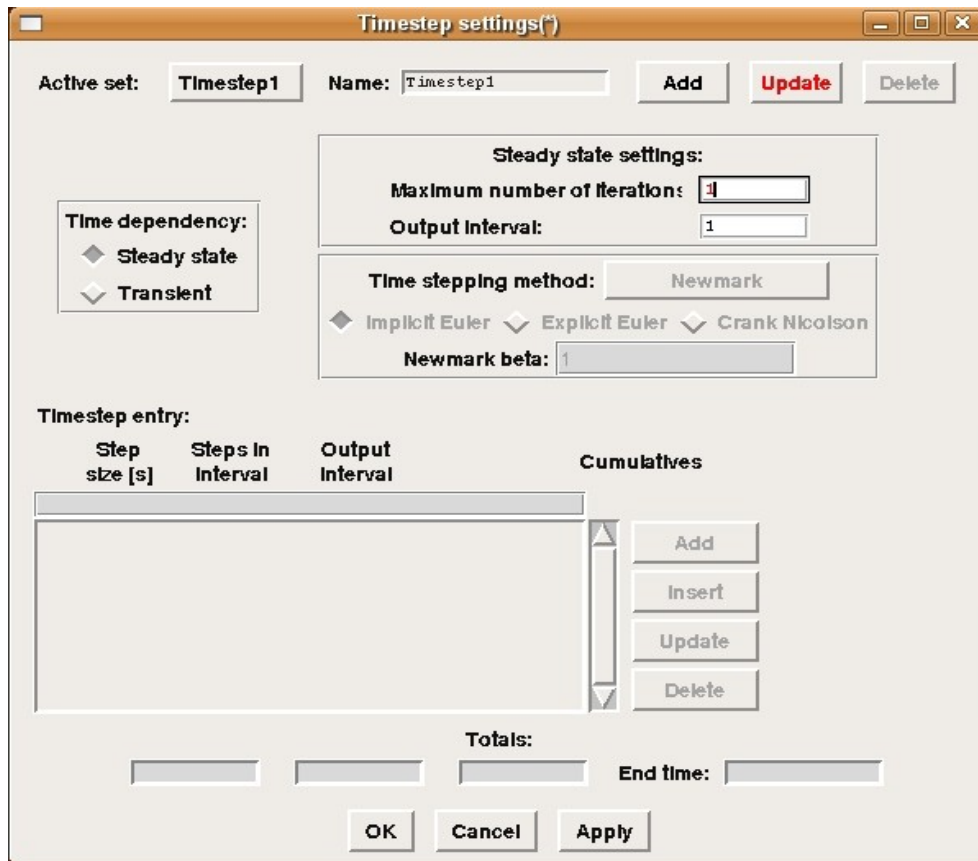


Figura 2.15. Fiestra gráfica das opcións da resolución temporal

- Na fiestra que aparece (ver figura 2.15) é necesario modificar o valor do campo **Maximum number of iterations** por 1 na fiestra **Steady state settings...**
- Facer clic no botón Update
- Facer clic no botón OK

Para resolver basta facer clic sobre o botón **Solve** na barra de ferramentas do control de procesos.

Como resultado desta acción aparece a fiestra da figura 2.16.

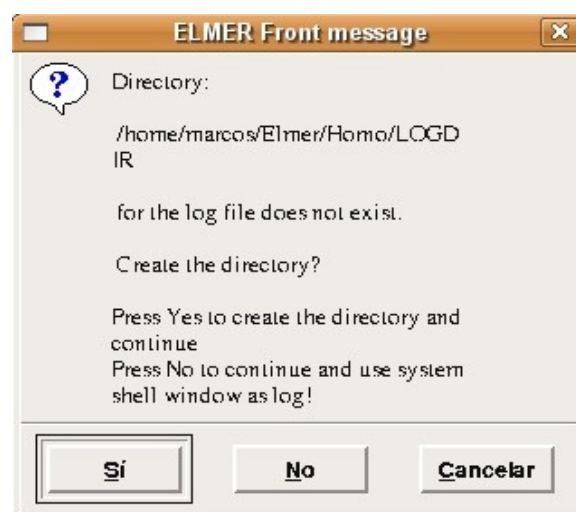


Figura 2.16 Fiestra de creación do directorio LOGDIR

Facer clic sobre o botón Si para que o directorio LOGDIR sexa creado.

Ó inicia-la simulación ábrese unha ventá na que se mostra información durante o proceso de resolución (ver figura 2.17). Cando a resolución remata, faise clic no botón OK para pecha-la ventá.

```
HeatSolve: TEMPERATURE ITERATION 1
HeatSolve: -----
HeatSolve:
HeatSolve: Starting Assembly...
DefUtils::DefaultDirichletBCs: Setting Dirichlet boundary co
DefUtils::DefaultDirichletBCs: Dirichlet boundary conditions
HeatSolve: Assembly done
HeatSolve: iter: 1 Assembly: (s) 0.13 0.13
HeatSolve: iter: 1 Solve: (s) 0.00 0.00
HeatSolve: Result Norm : 2470.82455781426
HeatSolve: Relative Change : 2.000000000000000
SolveEquations: (NRM,RELC): ( 2470.82455781 2.000000
StressSolve:
StressSolve:
StressSolve: -----
StressSolve: DISPLACEMENT SOLVER ITERATION 1
StressSolve: -----
StressSolve:
StressSolve: Starting assembly...
StressSolve: Assembly done
DefUtils::DefaultDirichletBCs: Setting Dirichlet boundary co
DefUtils::DefaultDirichletBCs: Dirichlet boundary conditions
StressSolve: Set boundaries done
StressSolve: Result Norm : 3.505743023626442E-002
StressSolve: Relative Change : 2.000000000000000
SolveEquations: (NRM,RELC): ( 0.350574302363E-01 2.000000
: *** Elmer Solver: ALL DONE ***
SOLVER TOTAL TIME(CPU,REAL): 1.03 1.45
ELMER SOLVER FINISHED AT: 2007/10/08 11:24:04
```

Figura 2.17. Fiestra gráfica de información da resolución

2.4. Postproceso

Para executar ElmerPost e visualiza-los resultados débese facer clic sobre o botón Results na barra de ferramentas do control de procesos (figura 2.18).

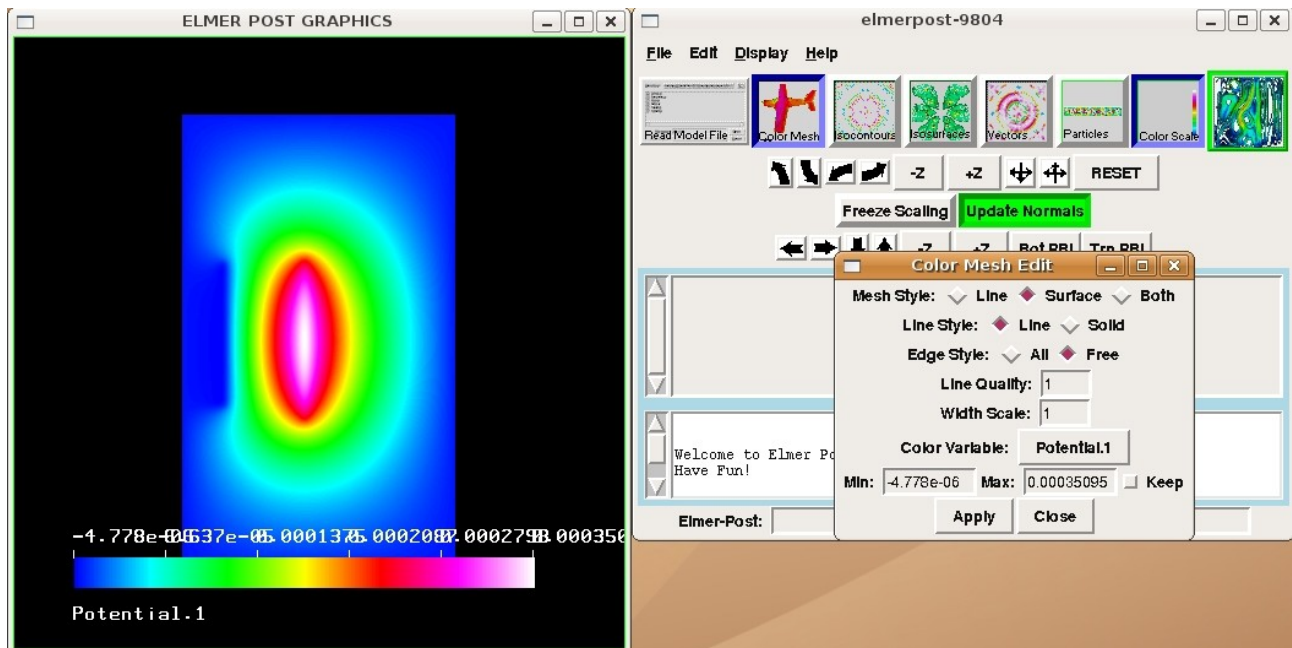


Figure 2.18. Ventás gráficas de ElmerPost

Si se desexa visualizar outra variable, por exemplo o desprazamento no eixo X, débense realiza-los seguintes pasos:

- Na ventá *Color Mesh Edit*, faise clic sobre o menú desplegable **Color Variable**, selecciónase a variable **Displacement_x** e púlsase o botón OK na ventá *vlist* (figura 2.19).
- Finalmente, para visualiza-la variable púlsase o botón **Apply** da ventá *Color Mesh Edit*.

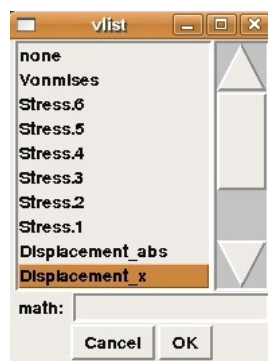


Figura 2.19. Ventá das variables a visualizar

Ó modificar unha variable, é necesario modificar a barra de cores, xa que non se modifica automaticamente. Os pasos a seguir son:

- Abri-la ventá facendo dobre clic sobre a icona *Color Scale* da barra de cores da ventá principal de ElmerPost.
- A continuación facer clic sobre o menú desplegable **Color Variable**, selecciona-la variable **Displacement_x** e pulsa-lo botón OK na ventá *vlist* (figura 2.19).

- E para que os cambios teñan efecto, faise clic sobre o botón Apply da ventá de *Color Scale*.

A continuación móstranse imaxes dalgúns variables que poden ser visualizadas en ElmerPost. A primeira imaxe que se mostra (figura 2.20) corresponde ó potencial vector magnético (parte real ou en fase) do modelo magnético.

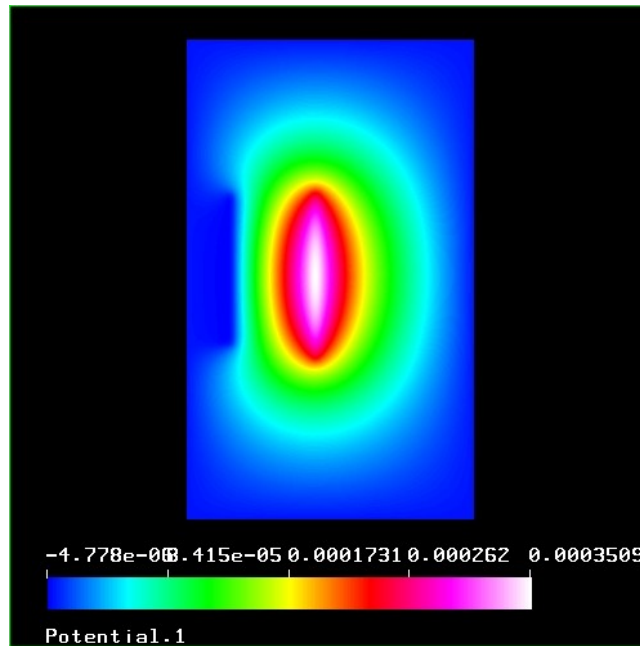


Figura 2.20. Imaxe do potencial magnético vector (parte real ou en fase)

A seguinte imaxe que se mostra (figura 2.21) é o campo de temperaturas do modelo térmico, razón pola cal soamente se visualizan os subdominios onde está definido o devandito modelo.

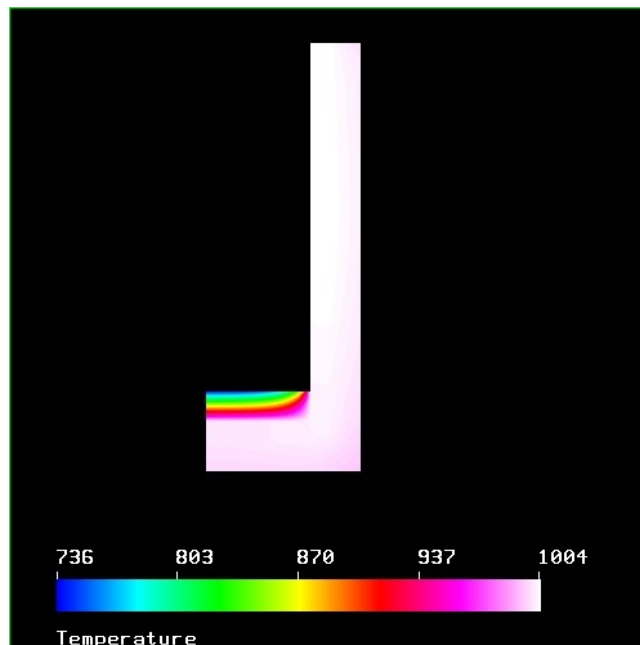


Figura 2.21. Imaxe do campo de temperaturas

Para rematar, móstranse algunhas das variables a visualizar do modelo mecánico, neste caso o campo de desprazamentos no eixo Z (figura 2.22)

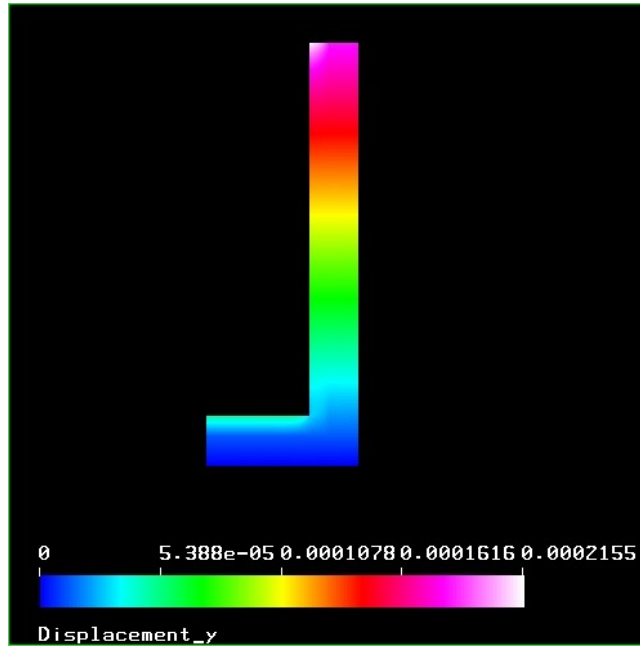


Figura 2.22. Imaxe do campo de desprazamentos no eixo Z

e norma de *von Mises* (figura 2.23).

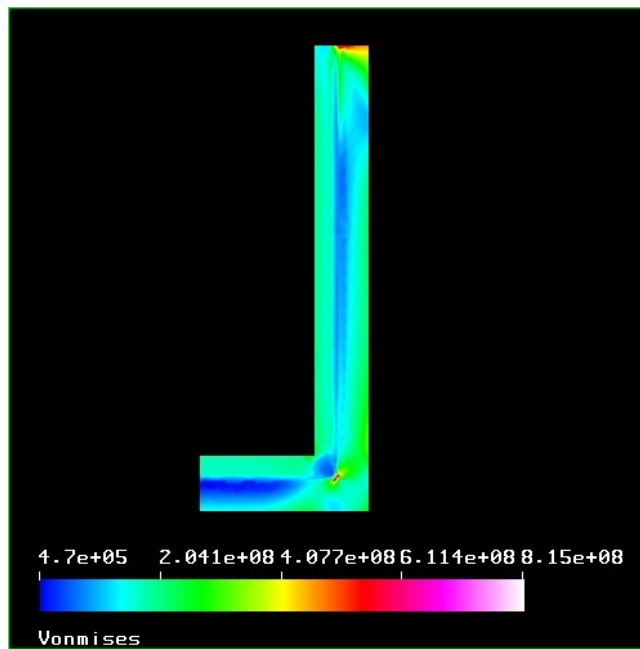


Figura 2.23. Imaxe da norma de von Mises

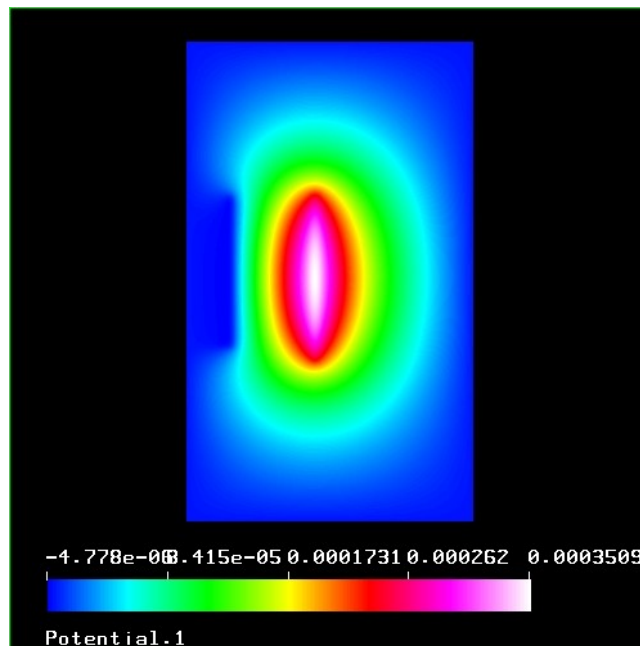
2.5. Comparación con COMSOL

Nesta sección quérese mostrar unha comparación gráfica entre os resultados obtidos de resolver este exemplo en Elmer e os resultados obtidos de resolver o mesmo exemplo en COMSOL Multiphysics, xa que COMSOL é o código de referencia en simulación multifísica.

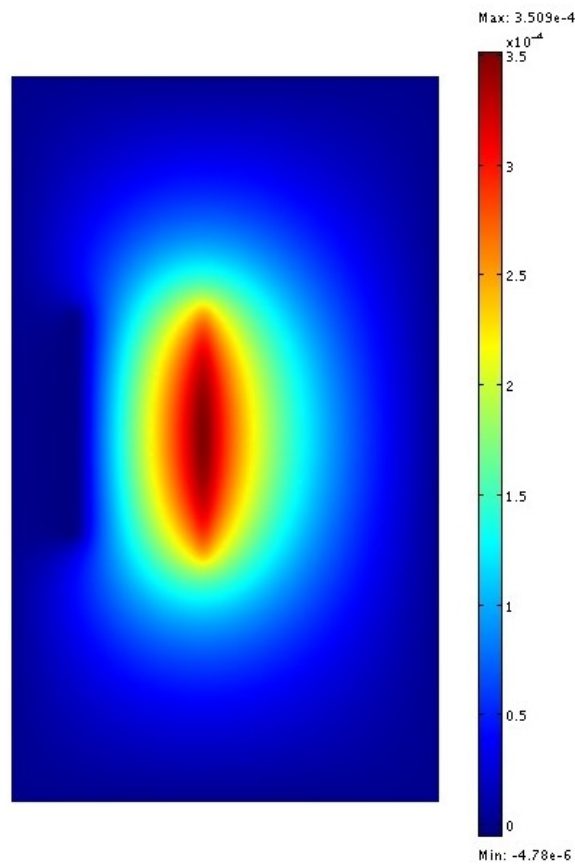
Como nota xeral a esta sección, hai que destacar que a escala de cores (que é a que asigna por

defecto cada código) non é a mesma para ámbolos códigos, pero os valores mínimo e máximo (que corresponden os resultados da simulación) permiten comprobar as mínimas diferencias entre ambos resultados.

Na figura 2.24 móstrase o potencial magnético vector en fase coa corrente,



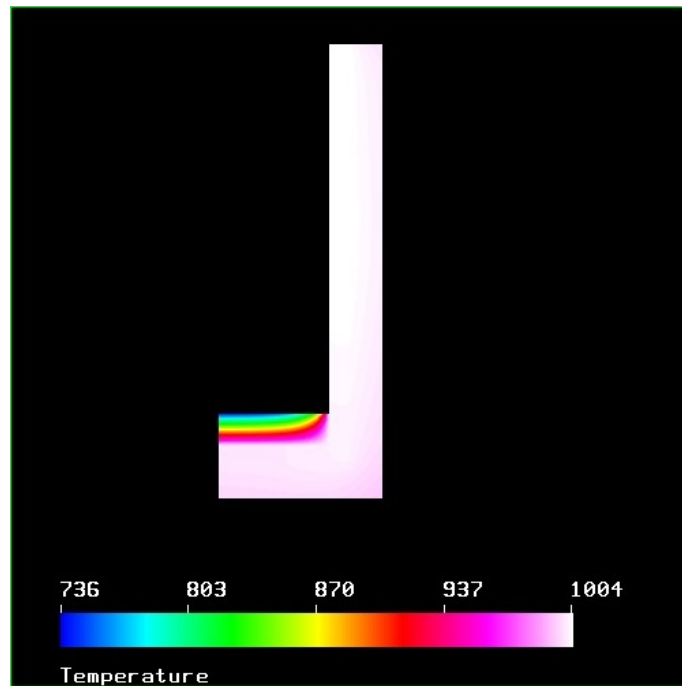
a) ELMER



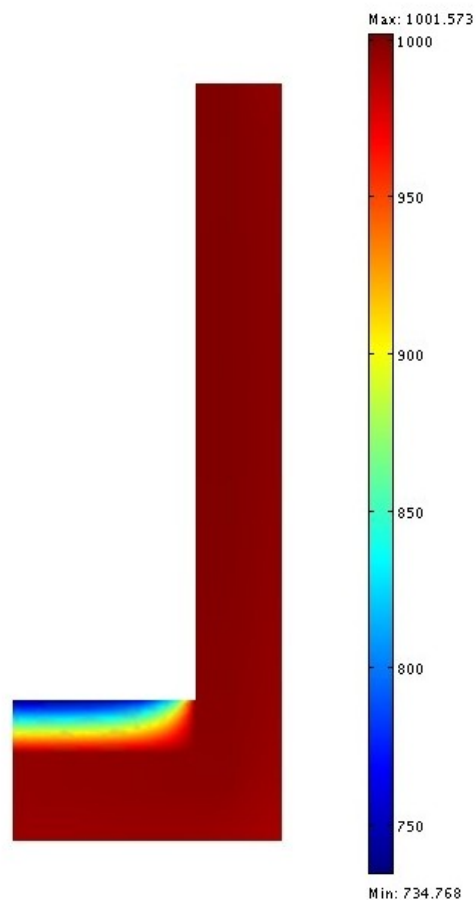
b) COMSOL Multiphysics

Figura 2.24. Comparación do potencial magnético vector

mentres que na figura 2.25 móstrase o campo de temperaturas



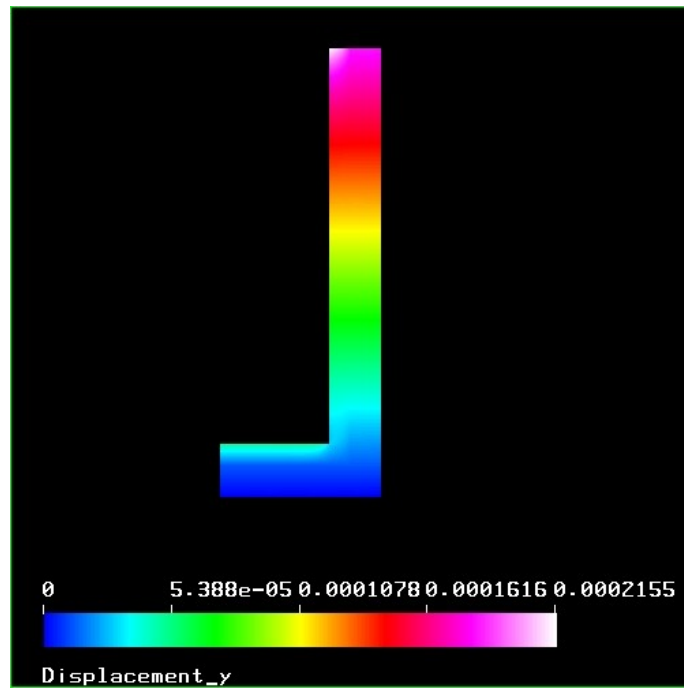
a) ELMER



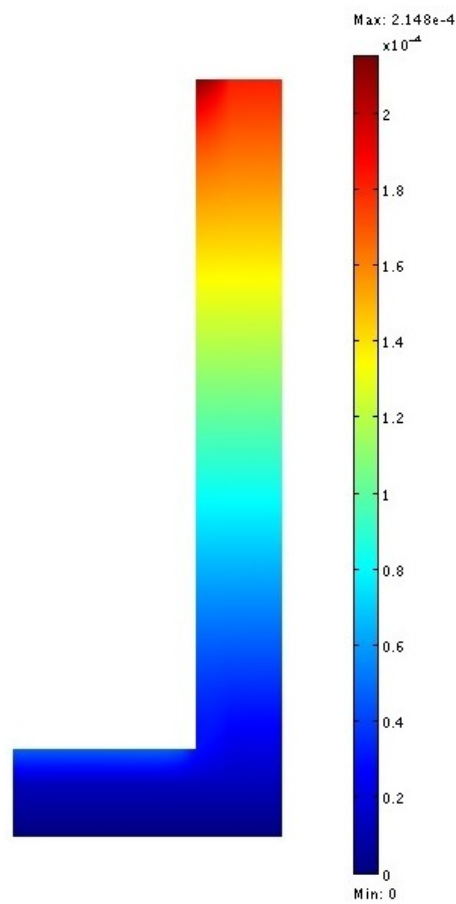
b) COMSOL Multiphysics

Figura 2.25. Comparación do campo de temperaturas

e para rematar,na figura 2.26 móstrase o desprazamento no eixo Z (compoñente vertical) e na figura 2.27 móstrase a norma de *von Mises*.

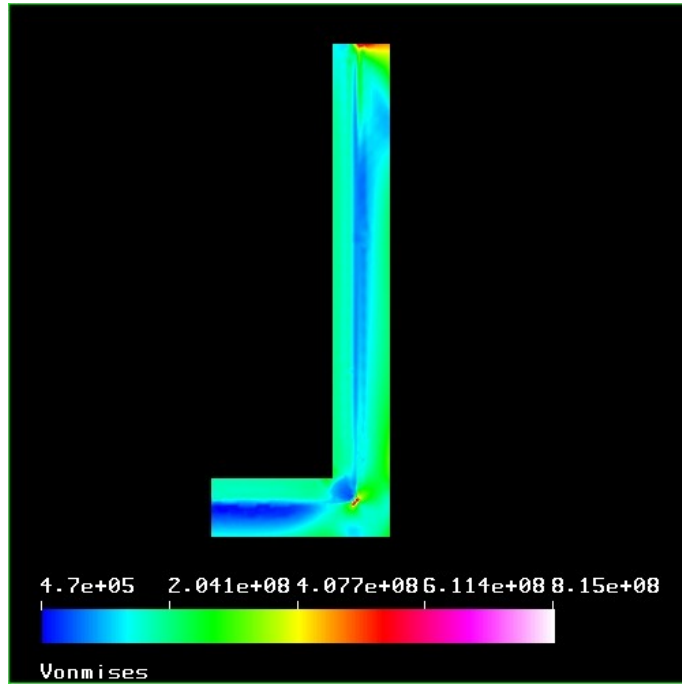


a) ELMER

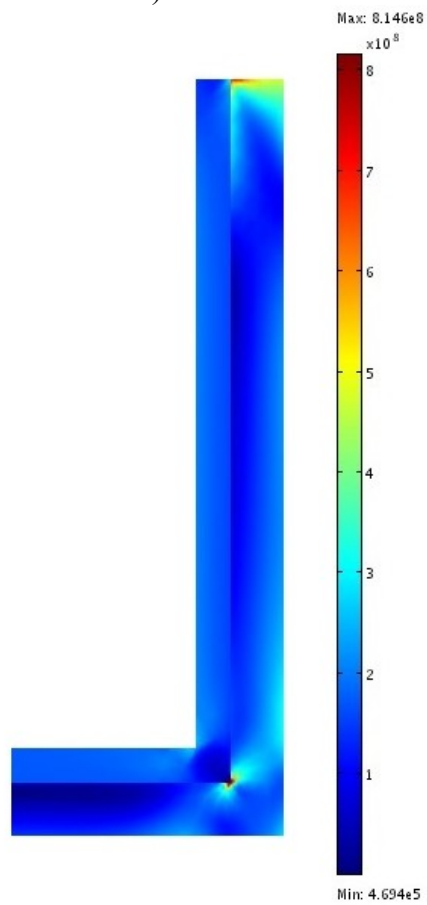


b) COMSOL Multiphysics

Figura 2.26. Comparación do campo de desprazamento no eixo Z



a) ELMER



b) COMSOL Multiphysics

Figura 2.27. Comparación da norma de von Misses

3. Resolución mediante arquivo *.sif

Recordamos que o arquivo *.sif é un arquivo de entrada e contén toda a información que necesita o resolvedor: directorio onde se atopa a malla, parámetros dos materiais, condicións iniciais, condicións de fronteira, etc. Este arquivo pódese crear a partires de ElmerFront (de feito é creado automaticamente e actualizado ó premer Save Model), ou ben cun editor de textos introducindo as palabras chave e valores asociados esenciais. No primeiro caso é mais longo pois garda todas as opcións por defecto. O exemplo que aquí presentamos foi escrito do segundo xeito, ten o esencial, e entendemos que simplifica a súa comprensión.

A execución do arquivo *.sif realízase de forma xeral escribindo na liña de comandos

```
$ ElmerSolver nomearquivo.sif
```

A execución desta liña provoca que se xeren os arquivos de resultados (arquivos *.ep e *.dat ou *.results) que son almacenados no cartafol indicado no arquivo *.sif.

A visualización dos resultados pódese realizar executando o módulo de elmerPost e cargando o arquivo *.ep. Este proceso é descrito ó final deste capítulo.

O arquivo consiste nas seccións seguintes:

- Header
- Simulation
- Body
- Initial Condition
- Body Force
- Material
- Equation
- Boundary Condition

e cada sección consta de:

- o nome da sección e a etiqueta
- un número de parellas de palabras chave - valor (keyword-value)
- e unha liña contendo a palabra "End".

Se a palabra chave non ten asociado un valor, Elmer asígnalle un por defecto.

A continuación descríbense cada unha das seccións coas palabras chave e valores asociados ó problema concreto deste tutorial, que se pode atopar no cartafol `.../multifisica/exemplos/forno/` do CD.

Sección Header

Nesta sección indícase o arquivo e a ruta do arquivo da malla, o directorio dos resultados, e os datos si se quere engadir algo nos directorios de búsqueda de arquivos.

Header

```
CHECK KEYWORDS Warn  
Mesh DB "MESHDIR" "malla"  
Include Path ""  
Results Directory ""  
End
```

Coa palabra chave "Mesh DB" especificase a ruta do arquivo da malla do problema, en formato Elmer. Neste caso, o arquivo da malla atópase no directorio *MESHDIR/malla*. As outras dúas palabras chave teñen asociados os valores por defecto.

NOTA MOI IMPORTANTE: O arquivo *.sif e o cartafol MESHDIR teñen que estar no mesmo directorio.

Ademais, neste caso, introdúcese a palabra chave "CHECK KEYWORDS" co valor "Warn". Esta palabra chave, asociada co devandito valor, permite verificar qué palabras chave se atopan no arquivo *SOLVER.KEYWORDS*, emitindo un *warning* en caso negativo, e evitar que o proceso de resolución sexa abortado no caso de que non estean no devandito arquivo.

Sección Simulation

Esta sección contén varios campos relativos ó conxunto do problema, como son o sistema de coordenadas, o tipo de simulación, o método de integración temporal (se procede), os nomes do arquivo de entrada do resolvedor (ElmerSolver), do arquivo de entrada para a visualización (ElmerPost) e do arquivo de datos, o cálculo de factores xerais, etc.

Simulation

```
Coordinate System = "Axi Symmetric"           ! Sistema de coordenadas  
  
Simulation Type = Steady State                ! Simulación estacionaria  
Steady State Max Iterations = 1              ! Número de iteracións máximo en estacionario  
  
Output File = "Forno.multifisico.dat"         ! Nome do arquivo de saída  
Post File = "Forno.multifisico.ep"           ! Nome do arquivo de saída para ElmerPost  
End
```

Sección Body

Esta sección ten tantos apartados como subdominios pois o dominio computacional pode consistir en varios subdominios diferentes ou '*bodies*'. Para cada subdominio, hai que indicar: o número (etiqueta) da sección de definición do modelo, o número (etiqueta) da sección de definición do material, o número (etiqueta) da sección das forzas volumétricas e o número (etiqueta) da sección das condicións iniciais (se procede). Estas seccións son descritas posteriormente.

Neste caso, o dominio xeométrico está composto por cinco subdominios con materiais diferentes e sobre os cales resólvense diferentes ecuacións (ver descrición do problema).

<i>Body 1</i>	! Subdominio do aire
<i>Name = "Aire"</i>	! Nome do subdominio
<i>Equation = 1</i>	! Número da sección da definición do modelo
<i>Material = 1</i>	! Número da sección da definición do material
<i>End</i>	
<i>Body 2</i>	! Subdominio do illamento
<i>Name = "Illante"</i>	! Nome do subdominio
<i>Equation = 2</i>	! Número da sección da definición do modelo
<i>Material = 2</i>	! Número da sección da definición do material
<i>Body Force = 2</i>	! Número da sección da definición da forza distribuída
<i>Initial Condition = 1</i>	! Número da sección da definición da condición inicial
<i>End</i>	
<i>Body 3</i>	! Subdominio do grafito
<i>Name = "Grafito"</i>	! Nome do subdominio
<i>Equation = 2</i>	! Número da sección da definición do modelo
<i>Material = 3</i>	! Número da sección da definición do material
<i>Body Force = 3</i>	! Número da sección da definición da forza distribuída
<i>Initial Condition = 1</i>	! Número da sección da definición da condición inicial
<i>End</i>	
<i>Body 4</i>	! Subdominio do material
<i>Name = "Material en po"</i>	! Nome do subdominio
<i>Equation = 3</i>	! Número da sección da definición do modelo
<i>Material = 4</i>	! Número da sección da definición do material
<i>Body Force = 4</i>	! Número da sección da definición da forza distribuída
<i>End</i>	
<i>Body 5</i>	! Subdominio da bobina
<i>Name = "Bobina"</i>	! Nome do subdominio
<i>Equation = 1</i>	! Número da sección da definición do modelo
<i>Material = 5</i>	! Número da sección da definición do material
<i>Body Force = 1</i>	! Número da sección da definición da forza distribuída
<i>End</i>	

Sección Equation

De novo esta sección pode ter varios apartados. Nela defínense o conxunto de ecuacións ou o modelo para cada subdominio do dominio computacional. Notar que na *sección Body* relaciónase as ecuacións cos subdominios. Por exemplo, o subdominio do grafito ten asociado o modelo 2 (*equation 2*), polo que nesta sección débense especificar os tres resolvedores, é dicir, nesta sección escóllense os solvers a utilizar sobre cada subdominio.

Nota: Nota-la diferenza entre o modelo que se resolve (*equation*) e o conxunto das ecuacións que compoñen o modelo (*solver*), é dicir, a palabra *equation* non se refire a ecuación senón que se refire ó modelo.

Os *solvers* actívanse mediante a palabra chave "Active Solvers" e os números (etiquetas) dos solvers definidos. É obrigatorio indicar entre paréntese o número total de solvers activos (agás si o

subdominio ten un único *solver* activo). Debido á implementación do código, cando existen varios subdominios e se quere calcula-las tensións sobre uns determinados subdominios, é obrigatorio que a palabra chave sexa indicada nesta sección (ver *Equation 2*).

<i>Equation 1</i>	! Ecuación para o aire e a bobina
<i>Name = "Vector Potential Equation"</i>	! Nome do modelo
<i>Active Solvers = 1</i>	! Activación do solver 1
<i>End</i>	
<i>Equation 2</i>	! Ecuación para o illamento e grafito
<i>Name = "Potential, Thermal and Elasticity Equations"</i>	! Nome do modelo
<i>Active Solvers (3) = 1 2 3</i>	! Activación dos solver 1,2 e 3
<i>Calculate Stresses = True</i>	! Cálculo de tensións
<i>End</i>	
<i>Equation 3</i>	! Ecuación para o material a fundir
<i>Name = "Potential and Thermal Equations"</i>	! Nome do modelo
<i>Active Solvers (2) = 1 2</i>	! Activación do solver 1 e 2
<i>End</i>	

Sección Material

Nesta sección descríbense os parámetros do material ou materiais que aparecen no problema. Os parámetros a definir sobre cada subdominio dependen do modelo que nel se vaia resolver. Neste caso os parámetros son:

- para a ecuación de magnetostática: a condutividade eléctrica
- para a ecuación da calor: a densidade (debido á forma na que o térmico calcula o efecto Joule) e a condutividade térmica
- para a ecuación de elasticidade lineal: o coeficiente de expansión térmica, a temperatura de referencia, o módulo de Young e o coeficiente de Poisson.

Hai que recordar que as etiquetas do material para cada subdominio xa foron definidas na sección *Body*.

```

Material 1
Name = "mat_aire"                ! Nome do material
Electrical Conductivity = 0      ! Condutividade eléctrica
End

Material 2
Name = "mat_illante"            ! Nome do material
Electrical Conductivity = 1.0e-8 ! Condutividade eléctrica
Heat Conductivity = 16           ! Condutividade térmica
Density = 2500                   ! Densidade
Heat Expansion Coefficient = 3e-6 ! Coeficiente de expansión térmico
Reference Temperature = 293.0    ! Temperatura de referencia
Youngs Modulus = 170E11          ! Módulo de Young
Poisson Ratio = 0.27             ! Coeficiente de Poisson
End

Material 3
Name = "mat_grafito"            ! Nome do material
Electrical Conductivity = 8.3E5  ! Condutividade eléctrica
Heat Conductivity = 160          ! Condutividade térmica
Density = 2200                   ! Densidade
Heat Expansion Coefficient = 8e-6 ! Coeficiente de expansión térmico
Reference Temperature = 293.0    ! Temperatura de referencia
Youngs Modulus = 34E9           ! Módulo de Young
Poisson Ratio = 0.3             ! Coeficiente de Poisson
End

Material 4
Name = "mat_material_po"        ! Nome do material
Electrical Conductivity = 1.0E4  ! Condutividade eléctrica
Density = 1                       ! Densidade
Heat Conductivity = 0.1          ! Condutividade térmica
End

Material 5
Name = "mat_bobina"             ! Nome do material
Electrical Conductivity = 1      ! Condutividade eléctrica
End

```

Sección Body Force

Esta sección contén a definición da forza distribuída, se existe, da ecuación que modela o problema.

Neste caso, defínese unha densidade de corrente no dominio da bobina mentres que para o illamento, o grafito e o material defínese como forza volumétrica o efecto Joule inducido pola circulación da corrente na bobina. Destacar dous aspectos importantes sobre a implementación da ecuación da calor e a ecuación de elasticidade lineal:

1. A forza distribuída na ecuación da calor vén dada polo produto da densidade pola fonte térmica.
2. A forza distribuída de orixe térmica na ecuación de elasticidade lineal defínese a través de propiedades do material e non a través desta sección.

As palabras chave a utilizar, e os seus valores asociados, pódense atopar no capítulo da ecuación correspondente no manual de modelos de Elmer.

Tal como se comentou antes, a fonte distribuída da ecuación da calor vén determinada pola multiplicación da densidade pola fonte térmica, razón pola cal, é necesario dividir a fonte da calor entre a densidade para que a forza distribuída sexa igual ó efecto Joule. Esta acción realízase mediante a función MATC. A continuación descríbese a definición da forza distribuída térmica para o illante (ver Body Force 2).

Entón debemos introducir no arquivo *.sif, as seguintes definicións.

<i>Body Force 1</i> <i>Current Density = 3.0e6</i> <i>End</i>	! Forza distribuída da bobina ! Densidade de corrente
<i>Body Force 2</i> <i>Heat Source = Variable Joule Field</i> <i>MATC "1e-8*tx/2500"</i> <i>End</i>	! Forza distribuída da illante ! Fonte da calor do illante variable co efecto Joule ! Función (MATC) que expresa a dependencia
<i>Body Force 3</i> <i>Heat Source = Variable Joule Field</i> <i>MATC "8.3e5*tx/2200"</i> <i>End</i>	! Forza distribuída do grafito ! Fonte da calor do illante variable co efecto Joule ! Función (MATC) que expresa a dependencia
<i>Body Force 4</i> <i>Heat Source = Variable Joule Field</i> <i>MATC "1e4*tx"</i> <i>End</i>	! Forza distribuída do material ! Fonte da calor para o subdominio do material

Sección Body Condition

Esta sección contén a información sobre as condicións de contorno para as diferentes ecuacións. A palabra chave *Target Boundary* permite especificar as fronteiras (da xeometría/malla) sobre as que se queren impor as condicións de contorno. Ademais, como se verá a continuación, é necesario especificar entre paréntese o número total de fronteiras. O nome das variables de cada ecuación e tódalas palabras chave que poden ser usadas nesta sección atópanse no capítulo correspondente da ecuación no manual de modelos.

NOTA: Non pode aparecer o número dunha fronteira en dous apartados de condicións de contorno diferentes.

<i>Boundary Condition 1</i>	
<i>Target Boundaries (3) = 2 11 24</i>	! Indicar número de fronteiras () e as etiquetas das fronteiras
<i>Potential 1 = Real 0.0</i>	! CC para o potencial en fase (C. Dirichlet)
<i>Potential 2 = Real 0.0</i>	! CC para o potencial en desfasamento (C. Dirichlet)
<i>End</i>	
 <i>Boundary Condition 2</i>	
<i>Target Boundaries (6) = 10 13 14 17 18 19</i>	! Indicar número de fronteiras () e as etiquetas das fronteiras
<i>Heat Flux BC = Logical True</i>	! Activar permisos para CC de Neumann
<i>Heat Transfer Coefficient = Real 10</i>	! Coeficiente de transferencia térmica
<i>External Temperature = Real 293</i>	! Temperatura de referencia
<i>End</i>	
 <i>Boundary Condition 3</i>	
<i>Target Boundaries = 4</i>	! Indicar etiqueta da fronteira
<i>Heat Flux BC = Logical True</i>	! Activar permisos para CC de Neumann
<i>Heat Transfer Coefficient = Real 10</i>	! Coeficiente de transferencia térmica
<i>External Temperature = Real 293</i>	! Temperatura de referencia
<i>Displacement 2 = 0</i>	! Especificación de apoio
<i>End</i>	

Sección Solver

Nesta sección defínese o resolvidor dos modelos e tódolos parámetros dependentes do resolvidor, tales como: opcións do resolvidor do sistema lineal e do sistema non lineal, o nome da variable a resolver, o nome do arquivo e o nome do procedemento do resolvidor, etc. Neste problema, como temos tres solvers, temos tres bloques.

Nota: Os solvers deben estar ordenados (en orde crecente e consecutivo) por orde de resolución.

As palabras chave e os valores asociados ós *solvers* están definidos no capítulo correspondente á ecuación no manual de modelos e no manual de ElmerSolver atópanse as palabras chave e valores asociados ós métodos de resolución.

O primeiro *solver* a definir é o *solver* do submodelo electromagnético.

<i>Solver 1</i>	! Submodelo electromagnético
<i>Equation = Potential Solver</i>	! Nome do solver
<i>Variable = Potential</i>	! Nome da variable
<i>Variable DOFs = 2</i>	! Número de graos de liberdade
<i>Angular Frequency = Real 50.0e3</i>	! Valor da frecuencia angular
<i>Calculate Magnetic Flux = Logical True</i>	! Especificación do cálculo do fluxo magnético
<i>Calculate Joule Heating = Logical True</i>	! Especificación do cálculo do efecto Joule
<i>Procedure = "StatMagSolve" "StatMagSolver"</i>	! Nome do arquivo e da subrutina
<i>Linear System Solver = Direct</i>	! Tipo de método do sistema lineal
<i>Nonlinear System Max Iterations = 1</i>	
<i>Nonlinear System Convergence Tolerance = 1.0e-6</i>	
<i>Nonlinear System Relaxation Factor = 1</i>	
<i>Steady State Convergence Tolerance = 1.0e-6</i>	
<i>End</i>	

Neste segundo bloque, defínese o *solver* asociado ó submodelo térmico.

<i>Solver 2</i>	! Submodelo térmico
<i>Equation = Heat Equation</i>	! Nome do solver
<i>Variable = Temperature</i>	! Nome da variable
<i>Variable DOFs = 1</i>	! Número de graos de liberdade
<i>Linear System Solver = Direct</i>	
<i>Nonlinear System Max Iterations = 1</i>	
<i>Nonlinear System Convergence Tolerance = 1.0e-07</i>	
<i>Nonlinear System Newton After Iterations = 1</i>	
<i>Nonlinear System Newton After Tolerance = 1.0e-02</i>	
<i>Nonlinear System Relaxation Factor = 1</i>	
<i>Steady State Convergence Tolerance = 1.0e-07</i>	
<i>End</i>	

Para rematar, queda por definir os parámetros asociados ó submodelo mecánico.

<i>Solver 3</i>	! Submodelo mecánico
<i>Equation = Stress Analysis</i>	! Nome do solver
<i>Variable = Displacement</i>	! Nome da variable
<i>Variable DOFs = 2</i>	! Número de graos de liberdade
<i>Linear System Solver = Direct</i>	
<i>Nonlinear System Max Iterations = 1</i>	
<i>Nonlinear System Convergence Tolerance = 1.0e-6</i>	
<i>Nonlinear System Newton After Iterations = 3</i>	
<i>Nonlinear System Newton After Tolerance = 1.0e-12</i>	
<i>Nonlinear System Relaxation Factor = 1.0</i>	
<i>Steady State Convergence Tolerance = 1.0e-6</i>	
<i>End</i>	

Unha vez terminada a descrición do arquivo, procédese a definir os pasos a seguir para a súa creación.

Primeiro débese abrir un editor de texto, dos dispoñíbeis na distribución, dende a liña de comandos; por exemplo o editor de texto *gedit*, que se executa escribindo

```
$ gedit
```

A continuación, hai que escribir cada unha das palabras clave e valores asociados que foron descritos anteriormente (texto que están no recadros), e gardar o arquivo co nome *Forno.multifisico.sif* (o nome pode ser variable pero a extensión do arquivo non se pode cambiar).

Para rematar, queda por lanza-la simulación mediante o uso de **ElmerSolver**, e para iso hai que escribir na liña de comandos

```
$ ElmerSolver Forno.multifisico.sif
```

Para visualiza-los resultados é preciso executar o módulo de ElmerPost. Isto faise escribindo na liña de comandos o devandito nome, é dicir, escribindo *ElmerPost*,

```
$ ElmerPost
```

o que da lugar ás fiestras da figura 3.1

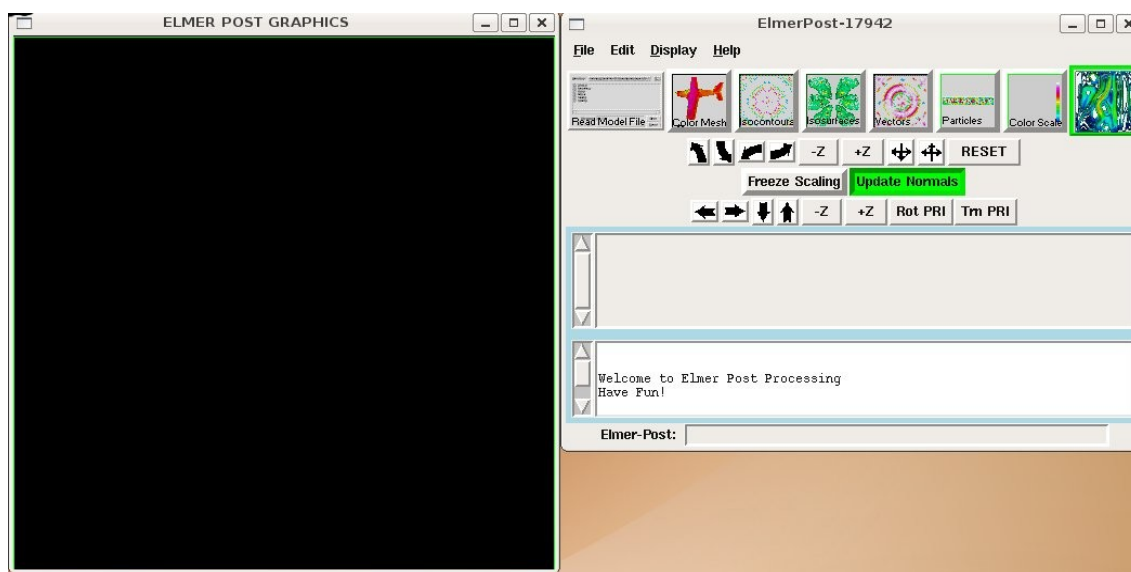


Figura 3.1 Fiestras de ElmerPost

Si se preme na icona *Read Model File* aparece a ventá de lectura do arquivo de resultados (Figura 3.2). Nesta ventá hai que seleccionar o arquivo de resultados *Forno.multifisico.ep* que se atopa no cartafol *.../MESHDIR/malla/*.

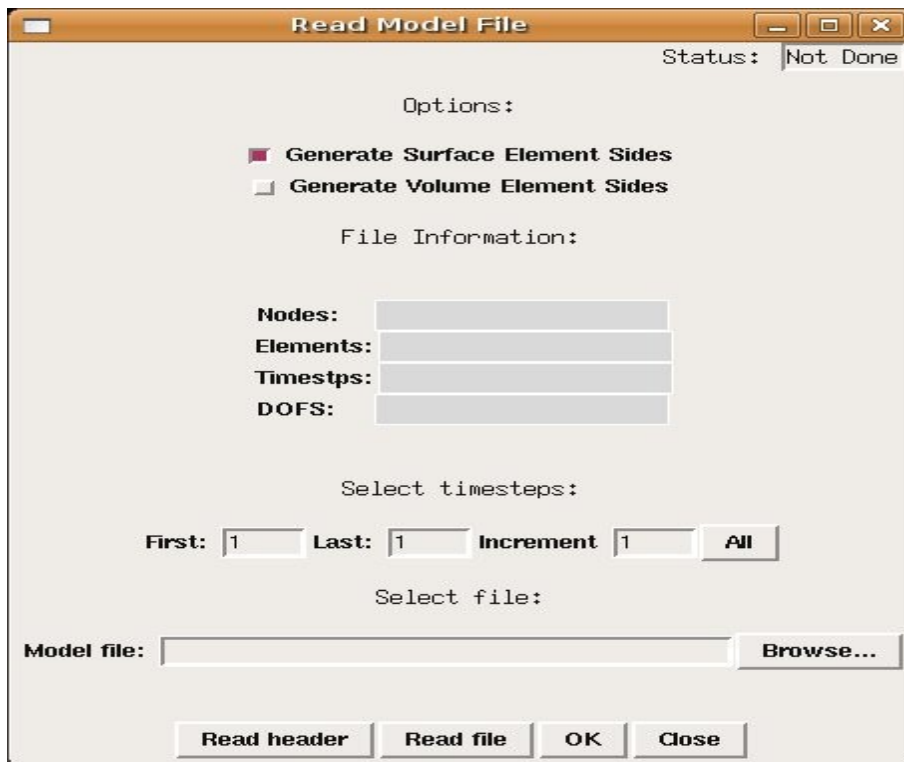


Figure 3.2. Fiestra de lectura do arquivo datos

Unha vez que se indica a ruta, hai que premer o botón OK.

A visualización das diferentes variables realízase do mesmo modo que na sección 2.4.