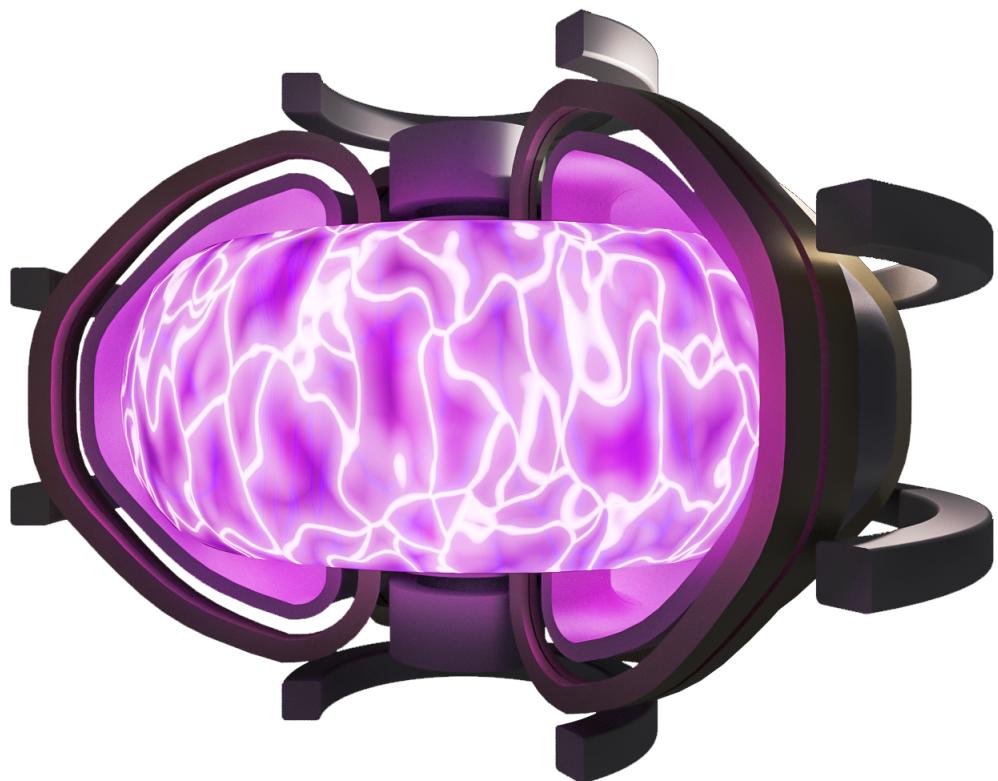




Universidade do Minho  
Escola de Engenharia  
Mestrado Integrado em Engenharia Física  
Teoria de Controlo



# Controlo de um plasma

Leander Reascos a89154

Magda Duarte a89144

Sara Ribeiro a89150

# Índice

<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>1 Notação de Espaço de Estados</b>	<b>6</b>
<b>2 Dinâmica do Plasma</b>	<b>9</b>
<b>3 Resposta em malha aberta</b>	<b>10</b>
<b>4 Controlo</b>	<b>11</b>
<b>5 Simulação<sup>[4]</sup></b>	<b>16</b>
5.1 Resultados . . . . .	16
<b>Conclusão</b>	<b>18</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>19</b>

## Introdução

Atualmente a maior parte da energia utilizada provém de combustíveis fósseis, que são poluentes e não renováveis. Na verdade, essa energia vem do Sol, daí que se possa ter chegado ao conceito de criar um "Sol na Terra".

A fusão nuclear baseia-se exatamente nisso, em reproduzir as reações que ocorrem no Sol de modo a criar energia de uma forma menos poluente e perigosa e de forma renovável, com reagentes abundantes na Terra: o deutério, facilmente extraído da água do mar, e o tritio, obtido de colisões de neutrões com lítio, ambos isótopos do hidrogénio.

O ITER ou *International Thermonuclear Experimental Reactor* é um projeto em equipa de vários países da Europa que pretende utilizar esta tecnologia para criar grandes quantidades de energia em intervalos de tempo nas dezenas de segundos.

Assim, neste trabalho aborda-se o controlo deste processo, mais especificamente o controlo no ITER, e simula-se como, a nível da engenharia, este é conseguido, combinando fundamentos de eletromagnetismo, termodinâmica e eletrónica.

## Fusão nuclear

A fusão nuclear resume-se, tal como o nome indica, à fusão de núcleos de átomos. É percecionada como um método de extração de energia altamente rentável, não poluente e revolucionário.

A partir de partículas, nomeadamente átomos de hidrogénio, cria-se um quarto estado da matéria: o plasma. Este é alcançado através do aquecimento substancial do material em questão até que este fique maioriamente ionizado. Através da aceleração das partículas, consegue-se que estas colidam e se fundam, libertando assim a tão pretendida energia.

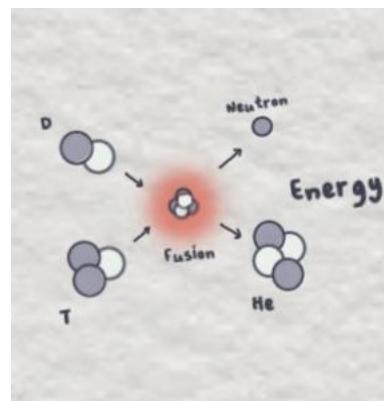


Figura 1: Fusão nuclear a partir de isótopos do hidrogénio.<sup>1</sup>

Atualmente, a fusão nuclear é alcançada com um dispositivo denominado tokamak. O controlo de um tokamak divide-se em diversos objetivos. De um ponto de vista geral, o propósito do controlo está associado à capacidade de manter um fluxo de plasma constante eternamente ou pelo menos por um longo período de tempo. Embora com pouco tempo de vida desse fluxo já se consiga a produção de uma quantidade avultada de energia, esta não compensa a que custou para o pôr a funcionar desde o início.

A atividade de “ligar” um tokamak, nomeadamente a de ligar o ITER, envolve a subida da temperatura do sistema até aos 150 milhões de graus Celsius e o estabelecimento de campos magnéticos na ordem das dezenas de Teslas, sendo para isso necessário o funcionamento contínuo de umas bobinas percorridas por correntes na ordem dos MegaAmperes.

O controlo de um tokamak divide-se em diversos objetivos. De um ponto de vista geral, o propósito do controlo está associado à capacidade de manter um fluxo de plasma constante eternamente ou pelo menos

---

<sup>1</sup> Imagem criada pelos colegas da cadeira de LC.

por um longo período de tempo. Embora com pouco tempo de vida desse fluxo já se consiga a produção de uma quantidade avultada de energia, esta não compensa a que custou para o pôr a funcionar desde o início.

A atividade de “ligar” um tokamak, nomeadamente a de ligar o ITER, envolve a subida da temperatura do sistema até aos 150 milhões de graus Celsius e o estabelecimento de campos magnéticos na ordem das dezenas de Teslas, sendo para isso necessário o funcionamento contínuo de umas bobinas percorridas por correntes na ordem dos MegaAmperes.

## ITER

O ITER é uma construção, em Cadarache, Bouches-du-Rhône, França, de um tokamak.

Para limitar o plasma e aquecê-lo utiliza-se um campo magnético, criado através de correntes que percorrem várias bobinas.

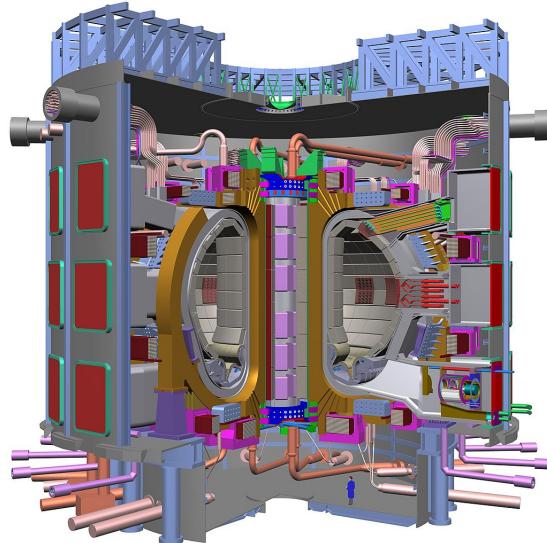


Figura 2: Tokamak do ITER

A grande dimensão do tokamak, assim como a similaridade dos conceitos fissão e fusão nuclear podem levar a que se associe a este processo as mesmas desvantagens dos conhecidos reatores nucleares. É importante mencionar que a energia proveniente de um plasma acarreta muitos menos riscos: praticamente nenhuma poluição, nenhum risco de explosão, controlo da energia produzida e emissão de pouca radiação.

Os componentes principais do tokamak e respetivas funções são:

- Câmara de vácuo: propicia o ambiente necessário para se atingirem a pressão e a temperatura necessárias para a criação do plasma.



- Bobinas geradoras de campos magnéticos poloidais. As correntes que percorrem estas bobinas irão gerar campos magnéticos que permitirão controlar o posicionamento radial do plasma relativamente

ao centro do tokamak. Serão as bobinas em que este projeto se baseará de forma a controlar o plasma. Estas bobinas existem "emparelhadas". Tem-se 5 bobinas no hemisfério superior que são simétricas às 5 bobinas inferiores, sendo percorridas pela mesma corrente.



- Bobinas geradoras de campos magnéticos toroidais. Contribuem com outras componentes capazes de regular, como as anteriores, o posicionamento do plasma, assim como a sua forma.



## 1 Notação de Espaço de Estados

As componentes usadas para controlar o plasma podem ser assemelhadas a um grupo de  $N$  circuitos com uma tensão, resistência e uma bobine como mostrados na figura 3, cuja evolução temporal é descrita por:

$$u_i = I_i R_i + L_i \dot{I}_i \quad (1)$$

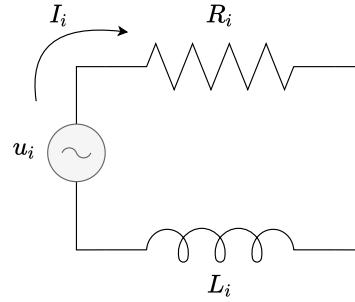


Figura 3: Circuito  $RL$  para a componente  $i$  do sistema de controlo

Mas existem vários destes circuitos à volta do plasma, que não estão isolados uns dos outros, de modo que o campo magnético existente em cada circuito induz uma corrente nos outros, fazendo com que a matriz  $L$  deixe de ser diagonal.

O plasma é composto por iões e eletrões que se movimentam, criando uma corrente  $I_p$ , a corrente do plasma. A temperatura no plasma é alta, o que faz com que a resistência seja alta. Esta resistência não está associada ao material, mas sim às colisões entre as partículas. O circuito do plasma não tem uma tensão associada, apenas uma resistência e uma indutância, logo pode ser caracterizado pela equação:

$$0 = L_p \dot{I}_p + R_p I_p \quad (2)$$

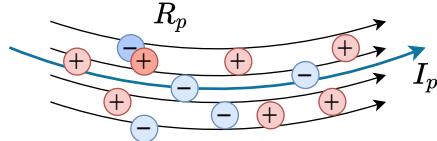


Figura 4: Explicação do circuito  $RL$  formado para o plasma

Tal como no caso anterior, o campo magnético gerado também influencia os outros circuitos.

Associadas às estruturas condutoras passivas como a câmara de vácuo, surgem as *Eddy currents*, geradas pela interação com os campos magnéticos que controlam o confinamento do plasma. São descritas pela seguinte equação:

$$0 = L_e \dot{I}_e + R_e I_e \quad (3)$$

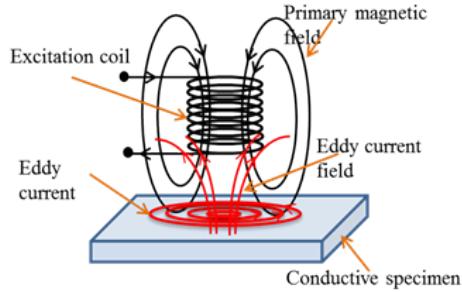


Figura 5: Formação das *Eddy currents*.

Assim como nos casos anteriores, estas correntes também induzem outras correntes através do campo magnético que criam. Todas estas induções são refletidas na matriz  $L$ , em que a diagonal representa a indutância de cada caso e os outros elementos representam as indutâncias que se geram entre eles. A perturbação do plasma é representada pelo termo  $E\delta u$ .

A equação que modela o sistema é:

$$L^* \dot{x} + R\dot{x} + E\delta\dot{u} = B\delta u \quad (4)$$

Para o caso do controlo a equação é simplificada, considerando a resistência do plasma nula e sem perturbações do sistema, obtendo-se:

$$\boxed{\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}}$$

onde:

- $x$  corresponde à variável de estado que engloba correntes ativas associadas ao próprio sistema de controlo, com  $I_i$  sendo a corrente do circuito número  $i$ :

$$x = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

- $A$  corresponde à matriz de estado que relaciona o vetor de entrada com as suas derivadas:

$$A = \left( L_a^* - \frac{L_{ap}^* L_{pa}^*}{L_p^*} \right)^{-1} R_a \quad (6)$$

- $L_a^*$  corresponde à matriz de indutâncias das bobinas que formam os campos magnéticos poloidais e toroidais necessários ao controlo do plasma;
- $L_p^*$  são as indutâncias associadas à corrente que percorre o plasma;
- $L_{ap}^*$  representa as indutâncias mútuas associadas à corrente induzida pelas bobinas no plasma;
- $L_{pa}^*$  refere-se às indutâncias mútuas associadas à corrente induzida pelo plasma nas bobinas;
- $R_a$  corresponde à matriz de resistências associadas aos circuitos elétricos necessários ao controlo do plasma.

- $B$  representa a matriz que relaciona o vetor de entrada com as derivadas do vetor de estados, no qual  $u_i$  são as tensões de entrada para cada circuito  $i$ :

$$B = \left( L_a^* - \frac{L_{ap}^* L_{pa}^*}{L_p^*} \right) \quad (7)$$

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

- $C$  é a matriz que relaciona o vetor de estado com o vetor de saída, que pretende medir as correntes dos circuitos e a do plasma:

$$C = \begin{pmatrix} \mathbf{1} \\ -\frac{L_{pa}^*}{L^*} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$y = \begin{pmatrix} x \\ I_p \end{pmatrix} \quad (10)$$

## 2 Dinâmica do Plasma

A dinâmica do plasma pode ser calculada a partir da resolução numérica da componente magnética da equação de Lorentz

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (11)$$

Onde  $\mathbf{B}$  é a carga total do plasma,  $\mathbf{v}$  a sua velocidade e  $Q$  a sua carga total. O campo magnético é gerado pelos circuitos RL, cuja tensão é controlada.

Os campos magnéticos gerados pelas bobinas do tokamak são visualizados no seguinte gráfico

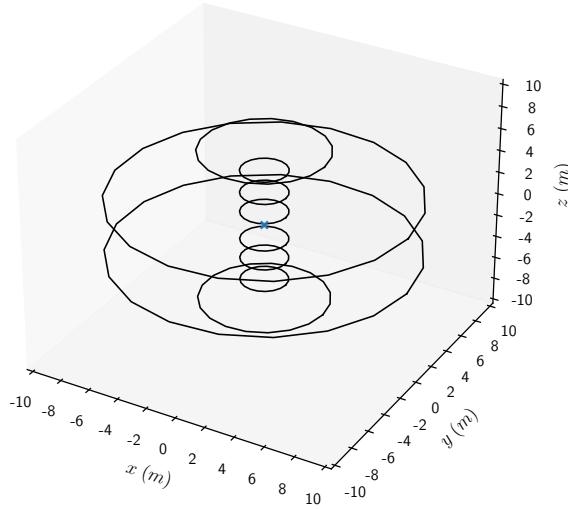


Figura 6: Circuitos de controlo do plasma

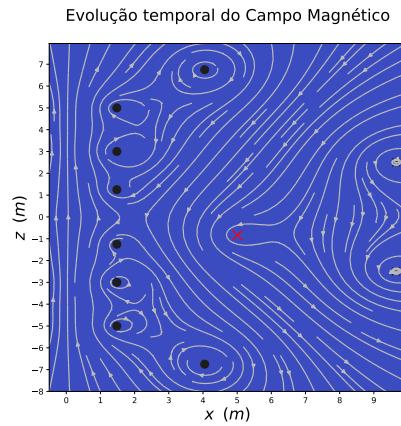


Figura 7: Campos magnéticos gerados pelos circuitos de controlo

Há que notar que a distribuição das bobinas é a mesma que a do tokamak do ITER, dado que são usados os seus valores como referência.

### 3 Resposta em malha aberta

A partir das equações de espaço de estados apresentadas na secção 1 obtém-se a resposta do sistema em malha aberta. Um sistema em malha aberta é um sistema sem controlo, em que se retira a realimentação. Neste caso, a resposta em malha aberta é dada pelo gráfico da figura 8.

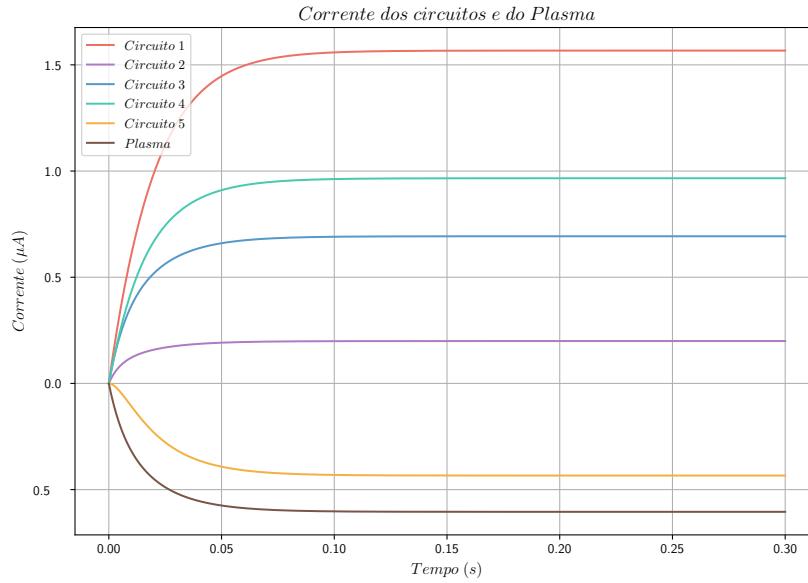


Figura 8: Reposta em malha aberta.

Deste gráfico foram extrapolados os valores necessários ao método de Ziegler-Nichols. Embora estes não tenham sido depois adotados, serviram como ponto de partida ao *tunning* do controlador PID. Pormenorizam-se os valores retirados como sendo:

- Ganho em regime permanente,  $K$ ;
- O atraso puro,  $L$ ;
- O tempo de subida até 63%,  $\tau$ .

A partir destes calculam-se então os parâmetros do PID - Tabela 2.

	K_p	K_d	K_i
P	$\frac{1}{RL}$	-	-
PI	$\frac{0.9}{RL}$	$3L$	-
PID	$\frac{1.2}{RL}$	$2L$	$\frac{L}{2}$

Tabela 1: Tabela auxiliar para cálculos dos parâmetros de um PID por Ziegler-Nichols em malha aberta.

## 4 Controlo

Neste projeto, teve-se como objetivo o controlo do posicionamento do plasma a uma dimensão. Definiu-se uma posição de referência relativamente à câmara que constitui o tokamak<sup>2</sup>.

A questão fundamental, durante o funcionamento de um tokamak, é a manutenção de uma estrutura/forma estável para este plasma, assim como a intocabilidade por parte do plasma nas paredes da estrutura que o rodeia. A forma de garantir ambos estes objetivos reside na aplicação dos campos magnéticos.

Um campo magnético aplicado a uma partícula eletricamente carregada que é dotada de uma certa velocidade permite a modificação da sua trajetória e posição. Pelo correto manuseamento deste campo magnético, a nível do seu valor e da sua direção, é possível então controlar a posição e, consequentemente, a forma das partículas que constituem o plasma, que são eletricamente carregadas.

A configuração geométrica ideal do plasma para o funcionamento do tokamak, garantindo a preservação da forma e a intocabilidade das paredes é a seguinte:

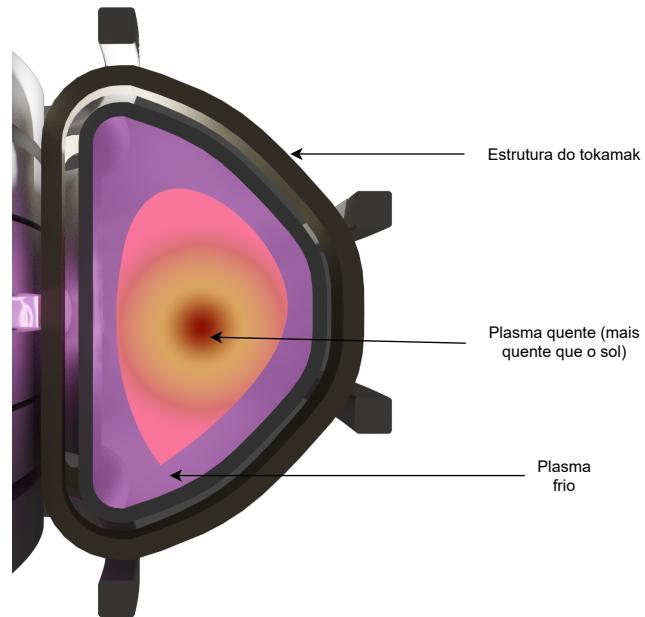


Figura 9: *Cross section* de um tokamak

Esta é conseguida por um fenómeno de *magnetic mirrors*, em que o plasma fica aprisionado devido ao campo magnético que é conseguido através de condições específicas.

Estipulando-se a posição de referência do centro do plasma dever-se-á alterar as correntes que percorrem as bobinas, o que altera o campo magnético, e garantir a movimentação e enformamento do plasma de forma a que se garantam as condições de referência pretendidas.

Uma vez que o plasma tem uma forma toroidal, ou seja, apresenta uma simetria circular, para o seu controlo teve-se em conta apenas a sua secção transversal- Figura 9- que depois foi revolucionada de forma a obter o toroide. Esta consideração ”elimina” a simulação no eixo y<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>Inicialmente foi empreendida uma fase do trabalho numa abordagem diferente. Pretendia-se perspetivar e controlar o plasma como um fluido e assim ter em conta toda a dinâmica associada, nomeadamente o movimento possivelmente heterogéneo das partículas que o constituem. Esta alternativa, contudo, revelou-se infrutífera devido maioritariamente a um problema: a dificuldade em construir uma programa base que contivesse essa mesma dinâmica e ainda a interface magnética requerida pelo plasma e pelo sistema em si.

<sup>3</sup>O referencial de eixos utilizado pode ser observado na Figura 6. Na Figura 9, o eixo y é, portanto, a direção perpendicular ao plano da folha, enquanto que a direção x, na qual nos concentrámos, corresponde à direção horizontal

Para controlar a posição em z seria necessário controlar as bobinas toroidais, o que não foi possível devido à falta de dados relativamente a essa situação no espaço de estados.

Uma vez estipuladas as considerações e aproximações a serem feitas, define-se o fluxo de funcionamento do sistema:

1. Avalia-se a posição e forma do plasma e compara-se com as posições de referência estabelecidas. Procede-se ao cálculo do erro:

```

1 #Error caculation
2     [x,z],_ = self._plasma.get_position()
3     r = np.array([x,z])
4     error = self._Reference - r[0]

```

2. Utiliza-se um controlador PID que, com base na diferença encontrada, aplica uma tensão às bobinas, o que regulará a corrente que as percorre. Na verdade, são utilizados 5 PIDs de forma a "personalizar" cada uma das tensões  $u_i$  de modo a ter o melhor funcionamento do sistema:

```

1 class PID:
2     def __init__(self,Kp,Ki,Kd,Ces):
3         self._Kp = Kp
4         self._Ki = Ki
5         self._Kd = Kd
6         self._Ces = Ces
7         self._last_error = 0
8         self._last_I = 0
9
10    def response(self,error,dt):
11        D = (error - self._last_error)/dt
12        I = self._last_I + error*dt
13        self._last_I = I
14        self._last_error = error
15        U = self._Ces + self._Kp*error + self._Ki*I + self._Kd*D
16        return U

```

3. Evoluem-se as correntes que percorrem as bobinas através da equação de espaço de estados e das tensões de saída do PID:

```

1 number_circuits = len(resistance)
2 R = np.identity(len(resistance))*np.array(resistance)*1e-3
3 L = np.array(inductance)*1e-6
4 La = L[:-1,:-1]
5 Lap = L[:-1,-1]
6 Lpa = L[-1,:-1]
7 Lp = L[-1,-1]
8 A = np.matmul(np.linalg.inv(-(La - np.matmul(Lap,Lpa)/Lp)),R)
9 B = La - np.matmul(Lap,Lpa)/Lp
10 C = np.zeros((number_circuits+1,number_circuits),float)
11 C[:-1,:] = np.identity(number_circuits)
12 C[-1,:] = -Lpa/Lp
13 D = np.empty((number_circuits+1,number_circuits),float)
14 D[:-1] = np.zeros((1,number_circuits))
15 D[-1,:] = np.zeros(number_circuits)
16
17 SS = StateSpace(A,B,C,D,np.array(current)*1e6)
18 Voltages = np.array(resistance)*1e-3*np.array(current)*1e6
19
20
21 class StateSpace:
22     def __init__(self,A,B,C,D,X0):
23         self._A = A
24         self._B = B
25         self._C = C
26         self._D = D
27         self._X0 = X0
28         self._Ts = []
29         self._Us = []

```

```

30         self.__sys = signal.StateSpace(A,B,C,D)
31         self.__Matrix = [A,B,C,D]
32
33     def get_Matrix(self):
34         return self.__Matrix
35
36     def get_Us(self):
37         return self.__Us
38
39     def get_sys(self):
40         return self.__sys, self.__x0
41
42     def sys_response(self,U,T):
43         '''
44             U: dim -> nT x n
45                 nT -- number of points of T
46                 n -- number of inputs
47             T: time vector of nT points
48         '''
49         self.__Ts.append(T)
50         self.__Us.append(U)
51         t, y, I = signal.lsim(self.__sys, self.__Us, self.__Ts)
52         return t,y,I

```

4. Uma vez atuadas as novas correntes, o campo magnético altera-se de acordo com as leis de Biot-Savart, que regulam o cálculo de campos magnéticos a partir de correntes. Para o presente caso fez-se uso da biblioteca *magpy* do Python que efetua o cálculo dos campos magnéticos uma vez fornecidas as informações acerca das correntes que existem no sistema:

```

1  def make_sources(self):
2      self.__coils = [magpy.source.current.Circular(curr=self.__currents[i],\
3          dim=2*self.__radius[i],pos=[0,0,self.__heights[i]])\
4          for i in range(self.__n_coils)]
5
6      for i in range(self.__n_coils):
7          self.__coils.append(\n
8              magpy.source.current.Circular(curr=self.__currents[i],\
9                  dim=2*self.__radius[i],pos=[0,0,-self.__heights[i]]))
10
11 def get_sources(self):
12     return magpy.Collection(self.__coils)
13
14 def get_B(self,plasma,xs,zs):
15     POS = np.array([(x,0,z) for z in zs for x in xs])
16     B = magpy.Collection(self.__coils+[plasma]).getB(POS).reshape(len(zs),\
17         len(xs),3)+np.full((len(zs),len(xs),3),self.__Toroid.B)
18     return B*1e-3
19
20 #ja dentro do ciclo da simulacao - tokamak_simulation
21 B = self.__MagnticSources.get_B(self.__plasma.ms, xs*1e3,zs*1e3)
22 self.B.append(B)
23 self.__plasma.apply_Force(B,h)

```

5. O plasma desloca-se e a sua forma modifica-se de acordo com a força de Lorentz já introduzida previamente e volta-se ao ponto 1 até que sejam encontradas as condições de referência. A transformação desta força numa aceleração, seguida de uma velocidade e de uma posição é feita a partir da resolução da equação diferencial que conjuga a segunda lei de Newton e a força de Lorentz:

```

1  def lorentz_force(r,B,M,Q):
2      '''Calculates Lorentz Force. Receives:
3          - r = p,v
4          - p = [x,y,z]
5          - v = [vx,vy,vz]
6          - B = [Bx,By,Bz]
7          - M = plasma mass
8      '''

```

```

9     p,v = r
10    dr = v
11    dv = Q*np.cross(v,B)/M
12    return np.array([dr,dv],float)
13
14 def apply_Force(self,B,h):
15     '''Temos a equacao diferencial mx'' = (I x B)'''
16     #calculate the new center position
17     #assuming that:
18     #      A is the area of the plasma
19     #      n is the eletric density
20     #      rho is the mass density
21     #      v as [vx,vy,vz] with the plasma velocities
22     #      r as [x,y,z] with the plasma mass center localization
23     M = n*Mh*self.get_surface()
24     Q = n*e*self.get_surface()
25     [x,z],[i,j] = self.get_position()
26     Br = B[i,j]
27     Br[1] = 0
28     self.B.append(Br)
29     self.V.append(np.copy(self._v))
30     r = [[x,0,z],self._v]
31     deltaR,deltaV = lorentz_force(r,Br,M,Q)*h
32     self._v[0] += deltaV[0]
33     self._v[-1] += deltaV[-1]
34     #update plasma mass center position
35     self.set_center(deltaR)

```

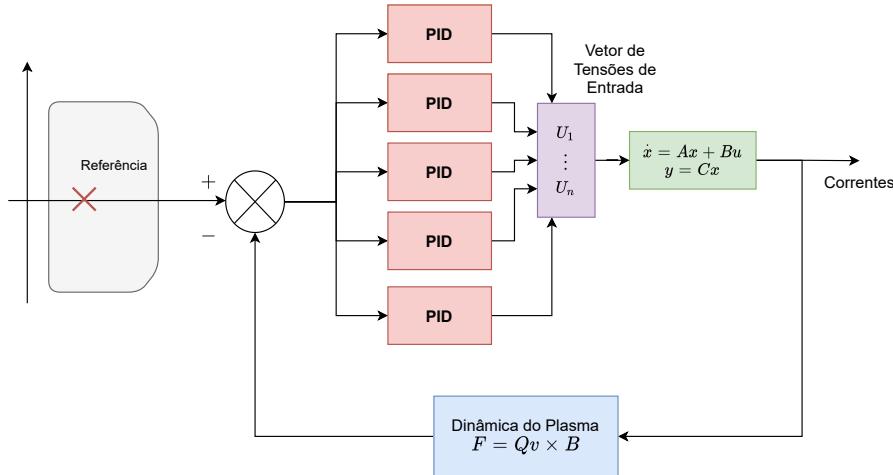


Figura 10: Esquema do controlo do plasma

Tendo em vista os passos atrás indicados, o projeto resumiu-se à criação de um programa em Python capaz de simular o sistema com as mesmas características do ITER, assim como as diferentes etapas do controlo. A nível do controlo, uma vez avaliada a preferência por um controlador PID, procedeu-se à parametrização do mesmo, dando prioridade ao seu cálculo através do método Ziegler-Nichols.

Tendo-se extrapolado os valores associados a um controlador P, PI, e PD, dados por este método, conclui-se que nenhuma das combinações garantia um controlo estável. A aplicação deste método não é tautológica, tendo, para o corrente caso, urgido a necessidade de encontrar os parâmetros ideais por métodos empíricos.

A equação que, uma vez descobertos os parâmetros ideais, descreve o PID é a seguinte:

$$c(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}$$

com  $e(t)$  a representar o erro que vem da realimentação do sistema.

A partir da análise dos resultados chegou-se aos seguintes parâmetros dos 5 PIDs.

$K_p$	$K_i$	$K_d$
8.918640e+06	5.351184e+06	4.459320e+06
9.711228e+07	5.826737e+07	4.855614e+07
2.499657e+07	1.499794e+07	1.249828e+07
1.462840e+07	8.777040e+06	7.314200e+06
8.413499e+06	5.048099e+06	4.206749e+06

Tabela 2: Parâmetros finais dos PID associados ao controlo do tokamak.

## 5 Simulação<sup>[4]</sup>

Como se referiu na secção Controlo, reduziu-se o problema ao controlo unidimensional da posição. Apenas se controlou a posição em x através do controlo das tensões dos diversos circuitos que, por sua vez, alteram as correntes que percorriam as bobinas poloidais com base na equação do espaço de estados derivada na secção 1.

Na figura seguinte analisam-se três momentos da simulação do sistema. Tendo como referência a posição 4.95m e inicializando-se o centro do plasma na posição 6m regulam-se as correntes de forma a formar um campo magnético que possibilite a movimentação do plasma para a esquerda. É possível percecionar a alteração do sentido das correntes que foram adaptadas respetivamente no sentido de gerar um campo e consequentemente uma força de Lorentz que assegura que o plasma é "empurrado" no sentido negativo do eixo dos xx.

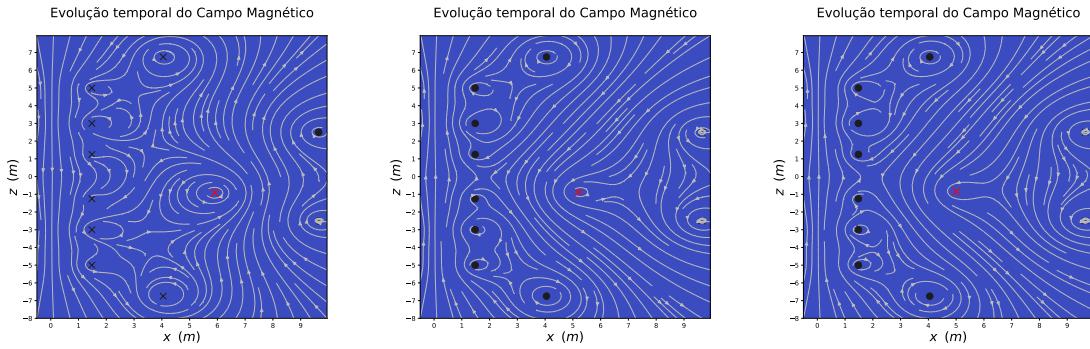


Figura 11: Evolução dos campos magnéticos e da posição do plasma. A vermelho o centro de massa do plasma e a preto as correntes das bobinas poloidais.

### 5.1 Resultados

Após a realização de várias simulações é possível perceber que são atingidos os resultados pretendidos, ou seja, chega-se ao equilíbrio da posição no eixo x a partir de uma qualquer posição inicial.

A título de exemplo apresentam-se os resultados de uma simulação cuja posição de equilíbrio em x foi predefinida como 4.95m, com velocidade inicial do plasma 0.

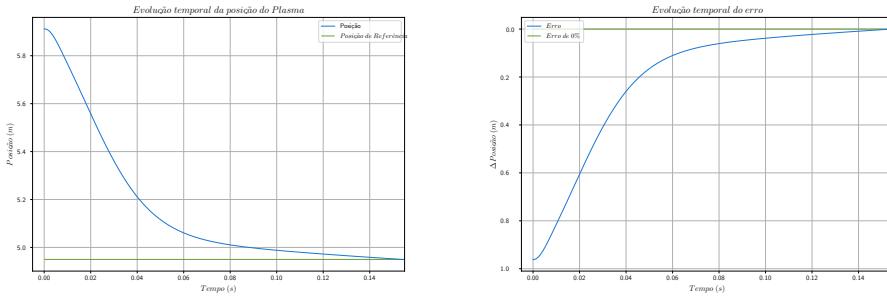


Figura 12: Evolução da posição e do erro

Através da observação dos gráficos relativos à posição e ao erro confirma-se que se atingiu o equilíbrio, sendo possível observar a diminuição do erro até um valor praticamente igual a zero, o que era pretendido e esperado.

<sup>4</sup>O vídeo final da simulação está em hiperreferência neste título.  
O código fonte da simulação encontra-se em [https://github.com/LeanderReascos/tokamak\\_StabilityControl](https://github.com/LeanderReascos/tokamak_StabilityControl)

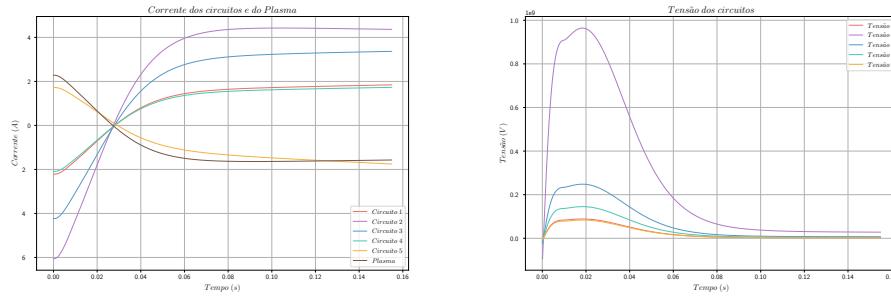


Figura 13: Correntes e tensões dos 5 circuitos em função do tempo

Os gráficos das correntes e tensões dos vários circuitos em função do tempo mostram como se efetua, de facto, o controlo do plasma. É administrada uma tensão a cada par de bobinas, cuja dimensão é determinada pelo PID, provocando correntes que depois induzem campos magnéticos. Neste exemplo pode-se reparar que foi necessária uma maior tensão no circuito 2 para que se conseguisse atingir o equilíbrio. É importante ainda mencionar que a evolução das correntes para sinais contrários faz parte do processo de movimentação do plasma, especificamente do momento em que este é "travado" após atingir a posição pretendida.

## Conclusão

O ITER, e mais especificamente o plasma, serão uma fonte de energia de grande relevância e qualidade no futuro.

Apesar de neste projeto terem sido utilizadas várias simplificações, consegui-se recriar a simulação do controlo de um plasma do ITER, ainda que de uma forma mais comprehensível e alcançável do que com a complexidade da iniciativa internacional.

Numa primeira fase encarou-se o problema de controlo do plasma como um de evolução fluidica com características magnéticas regulada pelas tensões impostas às bobinas circundantes. Esta abordagem requer, contudo, a existência ou construção de um programa capaz de lidar não só com a hidrodinâmica da situação, que é já um peso computacional enorme em algumas das aplicações mais básicas, como também com a conjugação dos fenómenos magnéticos, consequentes da natureza iónica do plasma e dos campos magnéticos gerados pelas bobinas. Tendo em conta a complexidade acrescida que esta alternativa acarreta, tentou-se encontrar um código fonte que servisse de um ponto de partida a partir do qual cresceria o nosso tokamak simplesmente com a introdução das condições iniciais associadas assim como o sistema de controlo. O detimento desta opção surgiu da inexistência de uma tal fonte de código pública que pudéssemos manusear facilmente ou que fosse confiável.

Finalmente, foi tomada a decisão de cingir o objetivo de controlo ao movimento unidimensional e estabilização do centro de massa do plasma relativamente à estrutura envolvente, o tokamak, controlando a força de Lorentz que atua sobre o mesmo que, por sua vez, é controlada pelas correntes geradoras dos campos magnéticos. O foco não estaria empregue, assim, a todo um conjunto de elementos de volume que se poderiam mover de forma dispersa mas sim a um ponto, assumindo-se, por razões de simplicidade, um movimento homogéneo para as restantes partículas que constituem o plasma.

Uma vez efetivado o método de trabalho e conseguida a simulação da dinâmica associada a uma carga elétrica no seio de um campo magnético, a preocupação resumiu-se ao controlo, nomeadamente, à avaliação das condições para surgir a força necessária sobre o plasma consoante a posição de referência imposta. Procedeu-se à avaliação do sistema em malha aberta no sentido de extraír as constantes essenciais ao cálculo dos parâmetros associados a um PID. Contudo, estes valores revelaram-se não ideais e, portanto, foi necessária uma avaliação empírica da melhor configuração do controlador.

Esta fase do projeto revelou-se desafiante a dois níveis: ao nível da percepção da influência de cada entrada do sistema nos valores das correntes e ao nível da dimensão extraordinária de constantes associadas ao plasma, como a sua carga. Este segundo aspeto revelou-se um problema devido à relação linear que a força de Lorentz apresenta com a carga do plasma, o que causou um deslocamento desmesurado.

Após diferentes conjugações de constantes proporcional, derivativa, e integrativa foi possível contornar estas duas problemáticas e observou-se uma evolução do plasma para a posição de referência desejada.

Pode-se reportar, todavia, o infortúnio de não se ter conseguido concretizar um controlo bidimensional como inicialmente se tinha objetivado. A regulação vertical da posição foi abandonada, como já se referiu, devido ao "conflito de interesses" entre as duas direções que não podia ser combatido somente com as bobinas poloidais.

Não obstante, conclui-se um projeto bem sucedido, tendo em conta as simulações satisfatórias alcançadas, no qual se aprendeu e aplicou os conceitos abordados na unidade curricular Teoria de Controlo.

## Bibliografia

- [1] R. Albanese et al 1989 Nucl. Fusion 29 1013
- [2] J.H.Schultz, T.Antaya, J.Feng, C-Y.Gung, J.V.Minervini, N.Martovetsky, P.Michael A.Radovinsky e P.Titus (2005) *The ITER central solenoid*
- [3] R. Albanese and F. Villone 1998 Nucl. Fusion 38 723
- [4] D.J.Campbell (2011) *Fusion Plasma Physics and ITER: An Introduction, 1. Plasma Physics for Magnetic Fusion*
- [5] D.J.Campbell (2011) *Fusion Plasma Physics and ITER: An Introduction, 2. Physics of Tokamak Plasmas*
- [6] G.Tommasi (2018) *Plasma Magnetic Control in Tokamak Devices*
- [7] Y.Gribov, A.Kavin, V.Lukash, R.Khayrutdinov, G.T.A.Huijsmans, A.Loarte,J.A. Snipes e L.Zabeo (2015) *Plasma vertical stabilisation in ITER*
- [8] F.F. Chen (2015) *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*
- [9] M. Claessens (2020) *ITER: The Giant Fusion Reactor*
- [10] M. Ariola e A. Pironti (2008) *Magnetic Control of Tokamak Plasmas*
- [11] R. Farber (2015) *Magnetohydrodynamics Modeling in Python*
- [12] K. Miyamoto (2004) *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion*
- [13] A.Castaldo, A.Mele, R.Albanesea, R.Ambrosino, G.De Tommasi, Z.P.Luo, A. Pironti, B.J.Xiao e Q.P.Yuan (2018) *Simulation suite for plasma magnetic control at EAST tokamak*
- [14] R. R. Khayrtd e V.E.Lukash (1993) *Studies of Plasma Equilibrium and Transport in a Tokamak Fusion Device with the Inverse-Variable Technique*
- [15] <https://pt.wikipedia.org/wiki/ITER>, consultado a 25/05/2021
- [16] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Tokamak>, consultado a 25/05/2021
- [17] [https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-a-tokamak-plasma\\_fig1\\_230927270](https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-a-tokamak-plasma_fig1_230927270), consultado a 21/05/2021
- [18] <https://www.iter.org/newsline/242/1351>, consultado a 21/05/2021
- [19] <https://www.iter.org/doc/www/content/com/Lists/Stories/Attachments/1510/Hubbard.pdf>, consultado a 21/05/2021