

*Relatório Pormenorizado da Actividade
Científica*

Triénio 2016/2018

Carlos Alberto Nogueira Garcia da Silva

Investigador Principal (nº 3913)

Instituto Superior Técnico

Janeiro de 2019

1. Introdução

O presente relatório visa satisfazer o imposto no artº 41º do Estatuto da Carreira de Investigação Científica, no respeitante à apresentação trianual de um relatório pormenorizado da actividade científica desenvolvida nesse período. Este relatório é referente ao período de Janeiro de 2016 a Dezembro de 2018.

A minha actividade científica decorreu no âmbito da unidade de I&D em que me integro — Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear. A referida actividade baseou-se essencialmente na investigação, na área da física dos plasmas, embora tenha também desempenhado funções relevantes de gestão, ensino e divulgação de ciência. Relativamente à actividade de gestão científica é de destacar o cargo de vice-presidente para os assuntos administrativos do IPFN, sendo nomeadamente responsável pela coordenação de vários projectos da EUROfusion. Em relação à docência, para além da orientação de alunos de doutoramento, as actividades consistiram essencialmente na responsabilidade pela unidade curricular do 2º ciclo “Técnicas de Diagnóstico em Plasmas” e pela unidade curricular do 3º ciclo “Métodos de Diagnóstico de Plasmas”. A actividade de investigação centrou-se principalmente em três áreas: (i) estudo do plasma periférico do tokamak ISTTOK; (ii) caracterização da turbulência na região do pedestal do tokamak JET (Culham Science Centre, Inglaterra); e (iii) exploração científica dos reflectómetros desenvolvidos pelo IST para o ASDEX Upgrade (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Alemanha). Na primeira área destacam-se a caracterização da turbulência e de estruturas de larga-escala no ISTTOK bem como da interacção entre ambas. Em relação ao tokamak JET as actividades foram focadas na caracterização detalhada de modos acústicos geodésicos (GAMs) usando reflectometria de microondas. Na última área destaca-se a coordenação da exploração científica dos sistemas de reflectometria. Destes trabalhos resultaram as publicações apresentadas na última secção deste documento.

Na secção seguinte deste relatório faz-se a descrição pormenorizada das actividades de investigação acima sumariadas.

2. Descrição pormenorizada das actividades de investigação desenvolvidas

2.1 Tokamak ISTTOK

- Evidência experimental da regulação da turbulência por fluxos $E \times B$ variáveis no tempo: As experiências realizadas no ISTTOK tiveram como objectivo compreender as condições em que os modos acústicos geodésicos (GAMs) podem influenciar o transporte turbulento. Isto foi conseguido através da realização de experiências perturbativas onde os GAMs foram estimulados e controlados externamente. Embora estas experiências não sejam simples, principalmente devido às ferramentas necessárias para estimular e caracterizar os GAMs, o ISTTOK está numa posição única para explorar a influência dos GAMs na turbulência e no confinamento. As experiências realizadas no ISTTOK revelaram que o aumento da taxa de cisalhamento do GAM acima do seu valor natural leva a uma redução do transporte turbulento e a um aumento no confinamento de partículas, demonstrando que os GAMs desempenham um papel importante na regulação das flutuações. Este resultado revelou que a taxa de cisalhamento dos GAMs é suficiente para regular as flutuações mas sem suprimir totalmente a turbulência;
- Caracterização da turbulência e de estruturas de larga-escala com o objectivo de contribuir para a compreensão do efeito isotópico em tokamaks: Verificou-se que o confinamento de partículas bem como a amplitude das estruturas de larga-escala são maiores em plasmas de deutério do que de hidrogénio demonstrando assim a importância dos mecanismos multi-escala para a compreensão do efeito isotópico. Usando decomposição biortogonal verificou-se que para além dos GAMs existem modos coerentes de muito baixa frequência (<5 kHz), possivelmente relacionados com fluxos zonais, que contribuem para as estruturas larga-escala;
- Contribuição para a validação de simulações numéricas da turbulência: Este trabalho abordou o estudo da turbulência de um plasma limitado poloidalmente usando simulações lineares e não lineares baseadas nas equações Braginskii. As simulações foram realizadas para os parâmetros de tokamak ISTTOK e os resultados comparados com os dados experimentais. Estas simulações permitiram não só uma melhor compreensão das instabilidades dominantes no plasma do ISTTOK mas também a validação de vários modelos teóricos e códigos numéricos existentes na Europa (BOUT++, GBS, HESEL e TOKAM3X);

- Colaboração na coordenação das actividades relacionadas com o desenvolvimento e manutenção de diagnósticos e exploração científica do ISTTOK;
- Realização de visitas ao tokamak ISTTOK para alunos de graduação e do ensino secundário.

2.2 Tokamak JET

- Caracterização de modos geodésicos acústicos usando “Doppler backscattering”: A partir de medidas da velocidade perpendicular da turbulência foram identificados GAMs de grande amplitude (correspondente a cerca de 50% da velocidade perpendicular local média) numa região estreita próxima do topo do pedestal do JET. Foi demonstrado que no JET os GAMs são regulados principalmente pela turbulência e não pelos mecanismos de amortecimento previstos teoricamente. Foi também observado que a amplitude do GAM é $\sim 20\%$ maior em plasmas de deutério do que em plasmas de hidrogénio.
- Dependência da amplitude do modo acústico geodésico nos parâmetros do plasma: Este trabalho teve como objectivo estabelecer o espaço de parâmetros para a existência dos GAMs no JET, bem como investigar os mecanismos de crescimento e amortecimento previstos pelos diferentes modelos teóricos. Isto foi conseguido usando dados experimentais obtidos com reflectometria com variações principalmente na corrente de plasma e na densidade. Foram encontradas evidências experimentais claras para os diferentes mecanismos que determinam a amplitude do GAM: turbulência, amortecimento colisional e não colisional. Embora os modelos teóricos indiquem que o amortecimento colisional seja dominante, as observações experimentais revelam que este só é eficaz em plasmas de baixa corrente e alta densidade. Foi ainda observada a supressão dos GAMs em plasmas de corrente elevada, em concordância com os modelos não colisionais.

2.3 Exploração científica dos reflectómetros desenvolvidos pelo IST para o ASDEX Upgrade

- Caracterização das flutuações de densidade: O sistema de reflectometria instalado no ASDEX Upgrade permite medidas únicas no interior da máquina o que permitiu estudar a assimetria das flutuações de densidade nos dois lados da máquina e a sua dependência nos parâmetros do plasma. Foi demonstrado que as flutuações de

densidade são mais baixas no lado interior como previsto teoricamente e que a sua evolução temporal está correlacionada com as condições do divisor;

- Observação de assimetrias poloidais nos perfis de densidade: Foram encontradas assimetrias pronunciadas na densidade do plasma, devido à formação de uma frente de alta densidade no divisor que influencia fortemente a dinâmica de fenómenos como os ELMs. Foi demonstrado que a frente de densidade aumenta com a densidade da descarga e com a potência de aquecimento e é mitigada pela injeção de azoto. Foi também demonstrado que os parâmetros da parte exterior do plasma são pouco influenciados pelo plasma do lado interior da máquina, contrariamente ao especulado anteriormente. A elevada resolução temporal do reflectómetro permitiu também demonstrar a formação periódica de uma frente de densidade associada com os ELMs;
- Caracterização das instabilidades na região no pedestal: Utilizando os reflectómetros de frequência fixa foram detectados modos coerentes e quase coerentes com frequências variando entre ~ 40 e 140 kHz e com uma evolução complexa no tempo após a transição L-H. O tipo e comportamento dos modos são diferentes para os ramos de baixa e alta densidade do limiar de potência L-H. A existência de um período de alternância entre os dois tipos de modos sugere a presença de instabilidades distintas. Estes modos podem desempenhar um papel importante na estrutura do pedestal, na sua estabilidade e no confinamento do plasma;
- Coordenação da exploração científica dos reflectómetros desenvolvidos pelo IST para o ASDEX Upgrade.

3. Cargos desempenhados

- Vice-Presidente do IPFN para os assuntos administrativos. Participação nas actividades de gestão corrente do IPFN e da EUROfusion, incluindo a elaboração de relatórios, planos de trabalho, documentos para as diferentes avaliações, bem como a coordenação da participação dos membros do IPFN em campanhas experimentais das diferentes máquinas europeias;
- Membro do Conselho de Administração do IPFN;
- Membro do “Governing Board” do programa doutoral APPLAuSE;
- Membro do “Board” da Divisão de Física de Plasmas da Sociedade Europeia de Física;
- Vice-presidente do Grupo de Física Experimental do IPFN e do tokamak ISTTOK;

- Líder de vários projectos resultantes de concursos competitivos da EUROfusion na área de transporte, interacção plasma-parede e desenvolvimento de diagnósticos;
- Membro do “Programme Committee” do “Workshop on the Role of Electric Fields on Plasma Confinement and Exhaust”;
- Membro do “Programme Committee” do “International Workshop on Electric Probes in Magnetized Plasmas”.

4. Supervisão de teses

Teses finalizadas

- Orientador da tese de doutoramento de Luís Manuel Rodrigues Guimarães intitulada "Poloidal Asymmetries at the ASDEX Upgrade tokamak", Maio de 2018
- Co-orientador da tese de doutoramento de Syed Ilyas Waseem Shah intitulada "Experimental Study of Secondary Instability to 2/1 Magnetic Island in COMPASS High Density Limit Plasmas", Maio de 2018
- Co-orientador da tese de doutoramento de Valentina Nikolaeva intitulada "LFS/HFS edge and SOL plasma turbulence studies using fixed frequency reflectometers at AUG", Maio de 2018
- Co-orientador da tese de mestrado de Inês Sofia Malhado Henriques intitulada “Design and exploitation of a vorticity probe for turbulence studies in fusion devices”, 2016

Teses em curso

- Orientador da tese de doutoramento de Luís Gil (início em Janeiro de 2017). Título: “Edge instabilities across the L-H transition and in H-mode”
- Orientador da tese de doutoramento de Egor Seliunin (início em Janeiro de 2017). Título: “Experimental investigation of the scrape-off layer enhanced radial transport using reflectometry diagnostics”
- Orientador da tese de doutoramento de Duarte Nina (início em Janeiro de 2018). Título: “Understanding the link between scrape-off layer and pedestal conditions at JET using density profile measurements by reflectometry”
- Orientador de pós-doutoramento de Dr. José Vicente. Premiado com uma “EUROfusion Researcher Grant” com a duração de 2 anos pelo seu trabalho em

“Modelling of plasma density measurements obtained with conventional microwave reflectometry”.

5. Participação em juries de teses

- Ralator e presidente juri da tese de doutoramento de Rennan Morales intitulada “Density profile reconstruction methods for extraordinary mode reflectometry”. École doctorale EMMA Université de Lorraine, França, Março de 2018
- Membro do juri da tese de doutoramento de Norberto José Sobral Catarino intitulada “Study of irradiation effects in tungsten and production of tungsten alloys for fusion devices”, Dezembro de 2018
- Membro do juri da tese de doutoramento de João Bernardo intitulada “Plasma rotation in JET and Tore Supra tokamaks”, Novembro de 2016
- Membro do juri da tese de Mestrado de Diogo Duarte Parente Godinho Soares de Carvalho intitulada “Plasma Tomography with Machine Learning”, Outubro de 2018
- Membro do juri da tese de Mestrado de Josué Resende de Andrade Lopes intitulada “Effects of Shear Flow on the Stability of Tokamak Plasmas”, Maio de 2018

6. Actividades lectivas

- Responsável pela unidade curricular do 2º ciclo: Técnicas de Diagnóstico em Plasmas
- Responsável pela unidade curricular do 3º ciclo: Métodos Diagnóstico de Plasmas
- Aulas em diferentes actividades de divulgação organizadas pelo IPFN como “PlasmaSurf”, cursos Athens e acções de formação para professores do secundário.

7. Publicações

Orcid ID: orcid.org/0000-0001-6348-0505

ResearcherID: L-6490-2013

1. Scaling of the geodesic acoustic mode amplitude on JET, C. Silva et al., Plasma Phys. Control. Fusion, 60 (2018) 085006

2. Turbulence level effects on conventional reflectometry using 2D full-wave simulations, J. Vicente, F. da Silva, S. Heuraux, G. D. Conway, C. Silva, and T. Ribeiro, *Review of Scientific Instruments*, 89 (2018) 10H110
3. Characterization of edge turbulence in different states of divertor detachment using reflectometry in the ASDEX Upgrade tokamak, V. Nikolaeva, L. Guimarais, P. Manz, C. Silva et al., *Plasma Phys. Control. Fusion*, 60 (2018) 055009
4. Role of isotope mass and evidence of fluctuating zonal flows during the L-H transition in the TJ-II stellarator, U Losada, T Estrada, B Liu, B van Milligen, J Cheng, C Silva, I Pastor, J M Fontdecaba, C Hidalgo, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 60 (2018) 074002
5. Isotope effects on L-H threshold and confinement in tokamak plasmas, C F Maggi et al, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 60 (2018) 014045
6. Experimental evidence of turbulence regulation by time-varying $E \times B$ flows, C. Silva et al, *Nucl. Fusion*, 58 (2018) 026017
7. Poloidal asymmetries in the edge density profiles on ASDEX Upgrade, L. Guimarais et al, *Nucl. Fusion*, 58 (2018) 026005
8. Secondary electron emission in DC operation of the retarding field analyzer, Nedzelskiy, I.S., Silva, C., Fernandes, H. *Journal of Instrumentation*, 12 (2017) C11019
9. Deuterium retention in tin (Sn) and lithium–tin (Li–Sn) samples exposed to ISTTOK plasmas, J.P.S. Loureiro, H. Fernandes, F.L. Tabarés, G. Mazzitelli, C. Silva, R. Gomes, E. Alves, R. Mateus, T. Pereira, H. Figueiredo, H. Alves, *Nuclear Materials and Energy*, 12 (2017) 709
10. 3D effects on transport and plasma control in the TJ-II stellarator, F. Castejon, et al, *Nuclear Fusion*, 57 (2017) 102022
11. Overview of ASDEX Upgrade results, A. Kallenbach, et al. *Nuclear Fusion*, 57 (2017) 102015 2017
12. Overview of progress in European medium sized tokamaks towards an integrated plasma-edge/wall solution, H. Meyer, et al, *Nuclear Fusion*, 57 (2017) 02014
13. Overview of the JET results in support to ITER, X. Litaudon et al, *Nuclear Fusion*, 57 (2017) 102001
14. Investigation of the transition of multicycle AC operation in ISTTOK under edge electrode biasing, A. Malaquias, R.B. Henriques, C. Silva, H. Figueiredo, I.S. Nedzelskiy, H. Fernandes, R. Sharma and V.V. Plyusnin, *Nucl. Fusion*, 57 (2017) 116002
15. The DEMO wall load challenge, R. Wenninger, et al., *Nucl. Fusion* 57 (2017) 046002
16. Axisymmetric oscillations at L–H transitions in JET: M-mode, E. R. Solano, et al., *Nucl. Fusion* 57 (2017) 022021
17. Experimental investigation of geodesic acoustic modes on JET using Doppler backscattering, C. Silva, J.C. Hillesheim, C. Hidalgo, E. Belonohy, E. Delabie, L. Gil, C.F. Maggi, L. Meneses, E. Solano, M. Tsilas and JET Contributors, *Nucl. Fusion* 56 (2016) 106026

18. Plasma turbulence in the scrape-off layer of the ISTTOK tokamak, R. Jorge, P. Ricci, F. Halpern, N. Loureiro and C. Silva, *Physics of Plasmas*, 23 (2016) 102511
19. Influence of long-scale length radial electric field components on zonal flow-like structures in the TJ-II stellarator, U. Losada, A. Alonso, B. Ph van Milligen, C. Hidalgo, B. Liu, M. A. Pedrosa, C. Silva and the TJ-II team, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 58 (2016) 08400
20. Multi-machine scaling of the main SOL parallel heat flux width in tokamak limiter plasmas, J. Horacek, et al., *Plasma Phys. Control. Fusion*, 58 (2016) 074005
21. Multi-scale study of the isotope effect in ISTTOK, B. Liu, C. Silva, H. Figueiredo, M.A. Pedrosa, B.Ph. van Milligen, T. Pereira, U. Losada and C. Hidalgo, *Nucl. Fusion*, 56 (2016) 056012
22. Profile measurements of the electron temperature on the ASDEX Upgrade, COMPASS, and ISTTOK tokamak using Thomson scattering, triple, and ball-pen probes, J. Adamek, H. W. Müller, C. Silva, R. Schrittwieser, C. Ionita, F. Mehlmann, S. Costea, J. Horacek, B. Kurzan, P. Bilkova, P. Böhm, M. Aftanas, P. Vondracek, J. Stöckel, R. Panek, H. Fernandes, and H. Figueiredo, *Rev. Sci. Instrum.*, 87, (2016) 043510

Lisboa, 4 de Janeiro de 2019

Carlos Garcia Silva

Carlos Alberto Nogueira Garcia Silva