

ISTSat-1 e a Nanosatrónica

No dia 9 de setembro o [ISTSat-1](#) fez dois meses de vida em órbita baixa sobre a Terra, em funcionamento contínuo 24 horas por dia. Completou 885 voltas à Terra e já carregou / descarregou a bateria que armazena a energia, proveniente do Sol, cerca de 885 vezes.

Os dados que nos chegam indicam que o ISTSat-1 está a transmitir sinais de rádio com uma potência cerca de 10 vezes menor do que a prevista, o que nalgumas situações dificulta a sua receção, dado o elevado nível de ruído eletromagnético que existe na região do IST Tagus e que introduz erros na receção da comunicação digital. O satélite responde aos comandos de Terra, mas a comunicação bidirecional comando / resposta, que alguns comandos exigem, pode não ser segura pelo que a equipa está a trabalhar em três direções: 1-caracterizar o ruído eletromagnético existente no IST Tagus; 2- melhorar o sistema de antenas da estação [CS5CEP](#) e 3- desenvolver algoritmos de correção dos erros nas tramas digitais recebidas.

O satélite tem sido recebido por vários radioamadores entusiastas (e.g. Paulo Delgado, CT2GUR) que têm feito um trabalho notável e que tem complementado o trabalho realizado na estação CS5CEP enviando-nos as tramas digitais recebidas para processarmos e recolhermos a informação.

Os [dados recebidos indicam que o satélite está operacional](#), está numa posição relativa à Terra bastante estável, com uma pequena rotação de cerca de 0,5 grau/segundo, o que está dentro do erro que os algoritmos usados para o controlo de atitude permitem.

Recentemente, a equipa recebeu a informação de que o ISTSat-1 já passou, por duas vezes, a menos de 500 m de satélites da constelação [Starlink](#). Sim, pode haver colisões no Espaço onde já há milhares de objetos, só a Starlink terá milhares de satélites e dentro de alguns anos haverá milhões de satélites e de resíduos de satélites. Apesar das preocupações que existem e que resultam deste intenso tráfego espacial, as colisões podem ser inevitáveis e já [aconteceram](#)¹. Tanto o ISTSat-1 como os satélites da constelação Starlink têm velocidades próximas de 7300 m/s, cerca de 7 a 10 vezes mais rápido do que uma bala na atmosfera e, estando em órbitas diferentes, podem colidir, mas a probabilidade é muito baixa², bastante menor do que a probabilidade de duas balas independentes chocarem na atmosfera terrestre. Apesar de cada satélite da Starlink pesar cerca de 250 kg e o ISTSat-1 apenas pesar cerca de 1,3 kg, os estragos seriam catastróficos para ambos os satélites.

A Nanosatrónica no IST

Quando, em 2008, a equipa resolveu ter um satélite do IST, podia ter feito o que outras universidades fizeram: comprar o satélite, fazer a sua integração desenvolvendo umas aplicações de software e pagar o seu lançamento. Bastava ter dinheiro, pois há empresas que entregam satélites em negócios do tipo do tipo chave na mão. Já ouvimos responsáveis pela área do Espaço na Academia afirmar que esta é a maneira de desenvolver a área de Aeroespacial na Universidade e quiçá no País, o que demonstra um desconhecimento muito grande sobre o que está em causa e o papel que a universidade deve ter na formação de estudantes universitários para se criar uma indústria de satélites.

Mas, em 2008, a equipa do IST [resolveu fazer um satélite de raiz](#), pois a única maneira de aprender é a fazer. [A equipa já tinha preparado no IST Tagus](#) uma pequena fábrica, financiada pelas Medidas de

¹ O satélite militar russo Kosmos 2251 e o satélite EUA Iridium 33 colidiram em 2009.

² Não há hipótese de estabelecer regras de prioridade nem de se aplicarem as normas para evitar abalroamentos no mar – quem tem propulsão que se desvie, neste caso os satélites Starlink, mas neles não existe força propulsora suficiente para provocar um desvio significativo.

Qualidade do Ensino do IST, capaz de poder produzir e ensaiar pequenas placas eletrónicas extremamente compactas que seriam a base do futuro ISTSat-1. Nestas placas são usados componentes eletrónicos que podem ter dimensões muito pequenas (ex: 1mm x 0,5 mm), peças que não são fáceis de manipular por um humano.

Em 2008, já a equipa tinha construído a estação de rastreio de satélites CS5CEP com a ajuda da AMRAD, que tem a licença de operação da estação. Conhecidos os parâmetros orbitais de um satélite, a estação consegue saber em cada instante onde ele está e consegue atuar sobre ele, quando ele estiver no seu horizonte. Consegue seguir automaticamente o satélite e consegue corrigir as frequências de emissão e de receção para anular o efeito Doppler, uma vez que os satélites têm frequências de emissão e de receção constantes e muito precisas, como acontece no caso do ISTSat-1, mas as frequências observadas na Terra são diferentes.

Com o desenvolvimento dos primeiros módulos do [ISTnanosat](#) que conduziram ao ISTSt-1, a equipa começou a perceber que um mundo novo se estava a abrir nos sistemas de conceção de eletrónica para o Espaço cujas técnicas ainda não eram ensinadas no IST. Há restrições novas, muito importantes, nomeadamente: 1- Custo muito elevado do lançamento de satélites que é proporcional ao peso e ao volume do satélite; 2- Módulos aptos a trabalhar no vácuo, 3- Robustez às interferências eletromagnéticas; 4- Robustez à radiação cósmica; 5- Problemas térmicos muito complicados e 6- Necessidade de fiabilidade e redundância dos sistemas para que o nanosatélite possa, em caso de avaria, ter alguma utilidade.

Quando se pretende miniaturizar um satélite para reduzir os custos de lançamento, as outras dificuldades agravam-se muito e a resolução dos novos problemas que surgiram no desenvolvimento de pequenos satélites talvez tenha sido a mais valia que a equipa do ISTSat-1 adquiriu.

É muito mais difícil fazer um satélite pequeno do que um satélite grande, pois um satélite pequeno tem os mesmos módulos que um satélite grande e a redução de dimensões dos módulos traz novos desafios tecnológicos.

Quando o antigo primeiro ministro, Dr. António Costa, visitou a inauguração do [TIC do IST](#) ficou surpreendido pelo ISTSat-1 ser tão pequeno, mas logo o Prof. Rui Rocha esclareceu “Os satélites não se medem aos palmos”. A equipa do ISTSat-1 até acha que a medida de avaliação deve ser inversamente proporcional à medição em palmos.

As novas técnicas de projeto são diferentes das usadas em satélites grandes (ou nas aeronaves), de tal forma que as poderíamos incluir numa área designada por Nanosatrónica – a arte de desenvolver e fabricar nanosatélites e que necessita de conhecimentos muito interdisciplinares de *Hardware* e *Software* de eletrónica, mecânica e informática, entre outras áreas.

O exemplo do ISTSat-1: só se aprende quando se faz!

A equipa do ISTSat-1 está a preparar um documento onde se salientam as novas técnicas desenvolvidas e aprendidas com o [desenvolvimento deste nanosatélite](#)³. Apenas como exemplo, referem-se alguns problemas que tiveram de ser resolvidos no desenvolvimento do ISTSat-1- um cubo com 10 cm de aresta com 5 painéis fotovoltaicos em 5 faces, uma antena para as comunicações com a Terra, a antena de ADSB numa das faces do cubo para receber sinais necessários à missão do satélite.

³ O sistema de antenas de radiocomunicações é um componente comprado, bem como os cinco painéis fotovoltaicos, pois a equipa não teve tempo de desenvolver e certificar estes sistemas

NO ISTSt-1 há 8 processadores digitais, seis existentes nos módulos desenvolvidos no IST e mais dois pequenos microprocessadores que controlam o sistema de antenas.

Os sistemas de radiocomunicações

O ISTSat-1 tem dois emissores de rádio com potências de emissão de 0,5 W e dois recetores de rádio independentes capazes de conviver com os emissores e receberem sinais com a potência de 2×10^{-15} W, num espaço muito limitado. O emissor de telemetria de dados, para ter um ritmo de transmissão elevado num canal com largura de banda reduzida, usa um sistema de modulações da frequência da portadora de radiofrequência que é linear e isto obriga a um rendimento energético de cerca de 30%, ou seja, 500 mW de radiofrequência e 1 W de calor dissipado num pequeno amplificador miniatura (3mm x 3mm) que não foi projetado para dissipar calor no vácuo. É preciso estudar e desenvolver técnicas para retirar este calor do pequeno amplificador para que este não esturre. Aqui a equipa da mecânica do IST em conjunto com os da eletrónica simulam os diferentes modos de retirar o calor para longe.

Em face do reduzido tempo que tínhamos para desenvolver e certificar o satélite para Espaço, a equipa decidiu fazer a antena para o recetor de ADSB e comprar o sistema de antenas grandes de comunicação com a Terra e os painéis solares que são as paredes do nanosatélite, sistemas que podem causar problemas mecânicos nos lançadores e exigem uma certificação complicada e demorada.

No caso do módulo de antenas que não foi fabricado no IST, não temos qualquer informação técnica útil que nos permita, agora, perceber onde está o problema que faz com que a potência que o ISTSat-1 está a emitir seja mais reduzida, sabendo nós que os emissores estão a funcionar bem. Se tivéssemos o nosso sistema de antenas teríamos hipótese de diagnosticar a situação.

À distância que o ISTSat-1 está da Terra, a esta chegará uma onda de rádio plana, mas cuja polarização é desconhecida e é afetada pelo movimento e atitude do satélite e pelo efeito de rotação de polarização de Faraday provocado pelo campo magnético terrestre. A estação de Terra tem que lidar com estes problemas.

A compatibilidade eletromagnética

O ISTSat-1 teve de satisfazer normas muito criteriosas de compatibilidade e suscetibilidade eletromagnética acautelados por cuidados especiais no projeto dos vários módulos. [Os ensaios finais](#) e a metodologia de ensaio tiveram a preciosa colaboração da ANACOM.

O campo magnético terrestre

É relativamente fraco, mas, pela lei de Faraday da indução, gera forças eletromotrizes nos condutores dos satélites em movimento e estas originam correntes elétricas que criam campos magnéticos que são contrários ao campo magnético terrestre travando o movimento do satélite. Em satélites que orbitam a Terra a menos de 1200 km de altura [este efeito é desprezável](#) em face do efeito de travamento de pequenas colisões com detritos minúsculos de poeiras que orbitam o espaço e também pela subida em altura de algumas moléculas de gases atmosféricos nomeadamente quando há tempestades solares.

O ISTSat-1 usa o campo magnético terrestre e interage com este para controlar e estabilizar o seu movimento, usando algoritmos que processam sinais provenientes de vários sensores a bordo. O mecanismo é semelhante ao de funcionamento de um motor de corrente contínua, em que o campo magnético terrestre constitui o campo magnético do estator e o satélite é o induzido que dispõe de três

bobinas indutoras colocadas ortogonalmente aos três eixos do satélite. Através do controlo das correntes nestas bobinas pode fazer-se com que o satélite rode em torno de qualquer eixo ou pode anular-se esse movimento como se deseja no caso do ISTSat-1, para estabilizar a sua atitude. Os algoritmos de controlo entram em ação sempre que o computador OBC é inicializado por comando da Terra ou por alguma anomalia existente no funcionamento do satélite, interna ou por ação de radiação cósmica.

Em 2016, a equipa do ISTSat-1 resolveu [integrar dois dos sistemas](#) já desenvolvidos no computador OBC. O sistema ADCS – processador de *Atitude Determination Control System* e o CDH – *Computer Data Handling*.

A energia disponível

Num nanosatélite a energia elétrica disponível é muito reduzida o que obriga a restrições muito grandes no tipo de dispositivos que se podem instalar no satélite e a utilizar os recursos energéticos de forma a que a missão do satélite não seja comprometida. A única fonte de energia resulta da conversão da energia solar através de painéis fotovoltaicos e a área destes é muito pequena, se quisermos evitar ter sistemas de desdobramento de painéis solares para aumentar a área efetiva destes, uma vez que isso implica a utilização de mecanismos que estão sujeitos a avarias.

Apesar do ISTSat-1 ter 5 painéis fotovoltaicos de alta eficiência fotovoltaica (cerca de 30%), a energia elétrica recebida do Sol pode variar entre energia nula se a superfície que não tem painel for orientada para o Sol, e a energia resultante de 1,7 painéis quando um vértice do cubo for orientado para o Sol. Com o satélite bem orientado para o Sol, a potência elétrica disponível oscilará entre 2,4 W e 4 W se os algoritmos de recolha de energia dos painéis, que estão sempre a operar, funcionarem corretamente na sua tentativa de maximizar a potência disponível para fornecer ao satélite.

A orientação correta do satélite, depende do sistema de controlo de atitude cujo objetivo é orientar a face que não tem painel solar para a Terra e impedir que o satélite rode em torno do eixo perpendicular a esta face. Esta ação ocorre sempre que seja dado um comando de Terra para inicializar o processador de gestão do satélite (OBC) ou for detetada alguma anomalia de consumo energético num sistema do satélite ou seja provocada por radiação cósmica sobre os sistemas digitais do satélite que obrigue ao *latch-up* de um dispositivo e a um consumo energético exagerado.

As baterias como reserva de energia

É possível acumular energia em baterias para poder responder a picos de consumo de alguns sistemas a bordo. Baterias com maior capacidade (e maior volume) podem acumular mais energia e proporcionar descargas mais suaves e aumentar, assim, o seu tempo de vida. Mas há uma limitação de espaço e, num satélite sempre a operar, as baterias podem degradar-se prematuramente. Isto obriga à criação de estratégias que tenham em vista aumentar a vida das baterias e do satélite. No caso limite de falha de baterias há sempre a possibilidade de utilizar e converter a energia direta dos painéis. Mas no ambiente do Espaço com radiação cósmica algum deles também podem falhar sendo necessário desenvolver sistemas de desativação automática de baterias e de painéis para se poder prolongar a vida de um nanosatélite.

O desempenho das baterias é muito condicionado pela temperatura a que estas estão submetidas. No caso de se atingirem temperaturas muito negativas o ISTSat-1 usa a própria energia das baterias para as aquecer nomeadamente na parte das órbitas com eclipse do Sol.

Quando a equipa foi financiada pela ESA em 2017, estava previsto que o ISTSat-1 seria transportado por um lançador usado na manutenção da ISS e seria lançado em 2019 a partir desta estação. Como a ISS é uma nave tripulada as exigências técnicas a que a ESA obrigou a equipa a introduzir no ISTSat-1 foram muito mais rigorosas do que seriam se o ISTSat-1 fosse lançado no Espaço por um lançador normal. A ESA ficou surpreendida por a equipa do IST querer conceber e construir todo o satélite e recomendou que fossem comprados, na indústria, alguns módulos mais críticos que já tivessem provado o seu uso no Espaço. Em particular, a equipa teve de convencer a ESA que a equipa do ISTSat-1 era competente para cumprir todas as exigências, nomeadamente no sistema de energia do ISTSat-1 [que é um módulo fundamental do satélite](#) e que iria usar as “perigosas” baterias de polímeros de iões de lítio com involucro mole, numa nave tripulada. Mas a ESA anuiu e acabou por colaborar na prova de conceito proposto pela equipa do ISTSat-1.

Entretanto a ESA decidiu que o ISTSat-1 faria parte da carga transportada no voo inaugural do foguetão Ariane 6, em vez de ser lançado da ISS e o lançamento do ISTSat-1 acabou por ser também atrasado pelo desenvolvimento deste lançador.

O arrefecimento/aquecimento no vácuo dos sistemas do satélite.

O estudo térmico de um nanosatélite que inclui a distribuição do calor pelas estruturas do satélite é uma área bastante importante da engenharia dos nanosatélites. Ao Sol o nanosatélite aquece pois recebe cerca de 120 mW por cm² de área perpendicular ao Sol, o que dá cerca de 20 W de potência recebida. Desta potência recebida só cerca de 2,4 a 4 W são convertidos em energia armazenada nas baterias. Inevitavelmente, no vácuo, a parte exposta ao Sol vai aquecer muito e o calor tem de ser rapidamente transportado para as outras partes do satélite e acumulado na “capacidade calorífica” do satélite para ser depois radiado.

A radiação térmica segue as leis de radiação de Stefan Boltzman e é a única forma de arrefecer o satélite. A capacidade de radiação depende da temperatura (elevada à quarta potência) do satélite. Para radiar tem de estar quente, mas é necessário poder calcular as estruturas de dissipação para se obterem temperaturas no satélite que não danifiquem os componentes.

O vácuo tem, também, um efeito sobre a maior parte dos componentes eletrónicos pois pode conduzir à evaporação de algumas substâncias usadas no seu fabrico e conduzir também à expansão de alguns componentes que foram fabricados na Terra, num ambiente de pressão atmosférica normal (1 bar). Uma das dificuldades do ISTSat-1 foi convencer a ESA de que poderíamos usar baterias dotadas de involucro flexível, não rígido, desde que a sua expansão fosse limitada por alguma barreira física, como acabou por acontecer.

Os primeiros testes do módulo OBC [foram feitos em 2016 num balão de alta altitude](#) do projeto [Balua](#), sendo o ISTSat-1 sido submetido a atmosfera rarefeita e baixas temperaturas. Mais tarde, todo o ISTSat-1 foi submetido a exaustivos testes no vácuo acompanhados de variações de [temperatura muito expressivas](#).

A radiação cósmica

A radiação cósmica tem “partículas” com alta energia que afetam muito os sistemas eletrónicos do satélite, podendo levar à sua desativação e destruição se não forem usadas medidas de mitigação dos efeitos.

O efeito mais nefasto ocorre na interação com os sistemas digitais nomeadamente os que são realizados com a tecnologia CMOS em que os circuitos lógicos são feitos pela associação em série diretamente à fonte de alimentação entre um transístor de canal N e um transístor de canal P. Como este tipo de transístor é

controlado pela carga elétrica na sua porta, pode ocorrer uma carga proveniente de energia externa que pode levar à condução simultânea dos dois transístores e provocar um curto circuito na fonte de alimentação. Este tipo de anomalia pode acontecer motivado por “partículas” de alta energia, que atravessam tudo, e que é designado normalmente por “*single event effect*”.

O ISTSat-1 foi concebido com componentes com alguma tolerância à radiação e, nas partes mais críticas, existem mecanismos de desativação temporária ou permanente de circuitos que possam comprometer a vida útil do satélite. O processador de comunicações foi um dos módulos onde foram criadas mais medidas de mitigação dos efeitos de radiações ionizantes. Mas, nos ensaios realizados na ESA, a equipa do ISTSat-1 preferiu submeter outro computador (o OBC “On Board Computer”) aos ensaios realizados com radiação ionizante tendo os [resultados obtidos sido muito satisfatórios](#).

Ensaio de resistência a vibração e aceleração

Tanto a estrutura mecânica como os módulos eletrónicos do ISTSat-1 foram projetados, desenvolvidos e fabricados no IST, para podermos satisfazer os exigentes ensaios de vibração requeridos para a colocação no Espaço de um satélite. O ISTSat1 passou com [distinção nestes ensaios](#).

A exploração espacial com nanosatélites

O lançamento de nanosatélites no Espaço terrestre, em órbitas baixas, proporciona uma capacidade muito acrescida de vigilância e monitorização de atividades terrestres, bem como a criação de novas aplicações. Com a redução de custos de lançamento proporcionada pelos nanosatélites, criou-se um mercado de exploração científica e comercial do Espaço que está ao alcance de muitas instituições. O Espaço já não está limitado aos fins governamentais e estratégicos dos países. Esta a acontecer a “democratização” do Espaço extraterrestre e Portugal deve estar atento a estas novas oportunidades.

A experiência adquirida e comprovada

No desenvolvimento do ISTSat-1 foram usadas novas tecnologias e realizados muito trabalhos que originaram um conhecimento notável dos problemas que existem no desenvolvimento e fabrico de nanosatélites: a **Nanosatânica**. Por se achar que o conhecimento interdisciplinar adquirido envolve várias áreas de engenharia, foi criado o IST [NanosatLab](#) com a participação do IST e vários institutos de investigação associados, com a primeira direção a cargo do [INESC-ID](#), que visa aproveitar este conhecimento e estimular novos estudos que serão úteis na criação de novos nanosatélites.