

## PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE ANTENA ESPAR

Edgar Ruano <sup>a1</sup>, Maria João Martins <sup>a2</sup>, António Baptista <sup>b</sup>

<sup>a</sup> CINAMIL - Centro de Investigação da Academia Militar, Academia Militar, Lisboa, Portugal

<sup>b</sup> Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

### RESUMO

Este artigo apresenta o projeto e construção de uma antena ESPAR (*Electronically Steereable Parasitic Array Radiator*), para comunicação sem fios (wireless) em 2,4 GHz. A ESPAR está inserida na categoria das antenas inteligentes (*smart antennas*), que devido à inclusão de componentes eletrónicos que permitem direcionar o feixe de radiação. Estas são agregados de antenas, constituídos por elementos parasitas. São mencionados os passos realizados para a construção da antena ESPAR. É apresentada a metodologia utilizada na fase de dimensionamento e otimização, realizada com auxílio do programa de simulação 4NEC2X. Posteriormente são apresentadas imagens relativas à construção da estrutura básica e à inclusão dos componentes eletrónicos. São apresentados os resultados das medidas das características de radiação, bem como a descrição do equipamento utilizado.

**Palavras-Chave:** Antena ESPAR, antenas inteligentes, agregados de antenas, elementos parasitas, métodos de simulação.

### ABSTRACT

This paper presents the design and construction of an ESPAR antenna (*Electronically Steereable Parasitic Array Radiator*), for wireless communications in 2.4 GHz. ESPAR is inserted in the category of smart antennas, due to the incorporation of electronic components that allow the azimuthal commutation of the radiation beam. These antennas are aggregates, consisting of parasitic elements. The steps taken to construct the ESPAR antenna are mentioned. The methodology followed in the design, simulation and optimization is presented and was carried out with the aid of the simulation program 4NEC2X. Images of the construction of the basic structure

---

<sup>1</sup> O presente artigo resultou do trabalho desenvolvido para a Dissertação de Mestrado elaborada pelo autor.

<sup>2</sup> Email para contacto: maria.martins@academiamilitar.pt

and inclusion of electronic components, are presented. The experimental results of measurements of radiation characteristics, and description of the equipment used are presented.

**Keywords:** ESPAR antenna, smart antennas, parasitic dipoles, antenna arrays, simulation methods.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje as Forças Armadas dos países mais desenvolvidos têm ao seu dispor as tecnologias mais inovadoras. O desenvolvimento destas permite, por parte de quem as possui, o domínio do teatro de operações. As telecomunicações desempenham um papel fundamental na Defesa de qualquer país.

Neste artigo descreve-se o projeto, simulação e construção de uma antena ESPAR (realização prática do protótipo) para comunicação sem fios a 2,4 GHz. A antena em questão é inovadora e destina-se à comunicação, controlo e navegação com sistemas não tripulados, terrestres e aéreos (Ministério da Defesa Nacional, 2012). Estes são utilizados para vigilância e reconhecimento do teatro de operações, e encontram-se apetrechados com câmaras, sensores e localizadores que permitem obter informações de forma segura e em tempo real (U.S. Department of Defense, 2013).

O tamanho reduzido, associado à capacidade de direcionar o seu feixe de radiação para o recetor pretendido, fazem desta a escolha adequada à sua utilização na comunicação com os sistemas não tripulados. A antena ESPAR construída possibilita a variação do diagrama de radiação em todo o azimute, adequando-se assim às utilizações referidas.

## 2. ANTENAS INTELIGENTES

O desenvolvimento das comunicações sem fios (wireless), levou ao estudo de antenas para operar na banda de frequência de 2,4GHz. A necessidade de antenas com diretividade elevada e formas específicas de diagramas de radiação, proporcionou o desenvolvimento de agregados de antenas (Martins & Neves, 2015).

A primeira antena deste tipo desenvolvida a partir de um agregado de antenas lineares (dipolos), foi a Yagi-Uda, inicialmente aplicada na receção de televisão analógica. Os primeiros agregados eram caracterizados por terem um diagrama de radiação fixo, e ausência de processamento digital sendo a variação do diagrama de radiação conseguida através da alteração da posição da antena.

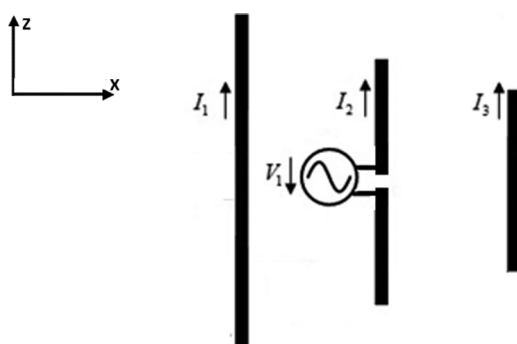
Na década de 1970, houve um avanço importante nos agregados de antenas, com o aparecimento dos agregados com processamento digital incorporado, conhecidos por antenas inteligentes (Kalis, Kanatas, & Papadias, 2014).

Em 1978, Roger F. Harrington criou o conceito de agregado com características diretoras, em que os seus elementos eram controlados por reatâncias. Este era constituído por um dipolo central, rodeado por um anel de seis dipolos parasitas carregados com cargas reativas (Harrington, 1978). O avanço seguinte neste campo surgiu com o aparecimento das antenas ESPAR, num projeto desenvolvido por Gyoda e Ohira nos Laboratórios ATR (Advanced Telecommunications Research) no Japão no ano 2000. A ESPAR é uma versão modificada do modelo original de Harrington, na medida em que são utilizados monopolos em vez de dipolos, e as cargas reativas são integradas sob o plano de terra (Kalis, Kanatas, & Papadias, 2014).

As antenas ESPAR podem ser incluídas na categoria de antenas inteligentes (smart antennas), pois incluem componentes eletrónicos que permitem alterar as características de radiação da configuração básica das antenas.

### 3. AGREGADO DE TRÊS ELEMENTOS

A configuração da antena ESPAR pode ser realizada com dipolos, sem plano de terra, ou com monopolos dispostos sobre um plano de terra. O estudo do comportamento dos elementos parasitas no diagrama de radiação é feito com o agregado de três elementos. Este agregado é constituído por três dipolos alinhados segundo o eixo  $xx$  (Figura 1.).



**Figura 1.** Esquema elétrico do agregado de três elementos

As amplitudes complexas dos campos elétricos de cada um dos dipolos são dadas pelas seguintes equações:

$$\bar{E}_{\theta_1} = j \frac{Z_0}{2\lambda r_1} I_1 h_{e_1} f_{D_1}(\theta) e^{-jkr_1} \quad (1)$$

$$\bar{E}_{\theta_2} = j \frac{Z_0}{2\lambda r_2} I_2 h_{e_2} f_{D_2}(\theta) e^{-jkr_2} \quad (2)$$

$$\bar{E}_{\theta_3} = j \frac{Z_0}{2\lambda r_3} I_3 h_{e_3} f_{D_3}(\theta) e^{-jkr_3} \quad (3)$$

em que:

$Z_0$  é a impedância característica no vácuo;

$\lambda$  é o comprimento de onda;

$r_1, r_2, r_3$  são as distâncias do centro da antena até um ponto de referência;

$I_1, I_2, I_3$  são as correntes de cada um dos dipolos;

$h_{e_1}, h_{e_2}, h_{e_3}$  são as alturas efetivas das antenas;

$f_{D_1}, f_{D_2}, f_{D_3}$  são os fatores direcionais das antenas;

$\theta$  é o ângulo de emissão;

$k$  é a constante de propagação.

A amplitude complexa do campo elétrico total é obtida através da equação (Silva, 2015):

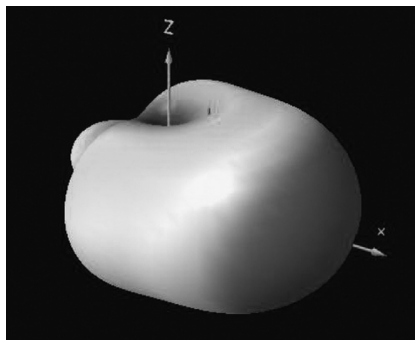
$$\bar{E}_{\theta_r} = \bar{E}_{\theta_1} + \bar{E}_{\theta_2} + \bar{E}_{\theta_3}$$

$$\bar{E}_{\theta_r} = \bar{E}_{\theta_2} \underbrace{\left( \frac{h_{e1}}{h_{e2}} \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} e^{jkd \cos \psi} + 1 + \frac{h_{e2}}{h_{e3}} \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} e^{jkd \cos \psi} \right)}_{\text{Fator espacial do agregado, } \bar{F}} \quad (4)$$

O cálculo do módulo do campo elétrico total do agregado é obtido através do produto do fator direcional da antena ativa pelo módulo do fator espacial do agregado. (Martins e Neves, 2015)

$$|E_{\theta_r}| = |E_{\theta_2}| * |\bar{F}| \quad (5)$$

Através do programa de simulação foi determinado o diagrama de radiação do agregado de três elementos, apresentado na Figura 2.



**Figura 2.** Diagrama de radiação em 3D do agregado de três elementos

Observa-se na Figura 2, que o diagrama de radiação apresenta um máximo de radiação na direção positiva do eixo dos  $xx$ . A orientação do máximo é devido ao comportamento do dipolo de maiores dimensões como apresenta um caráter refletor e o de menores dimensões um caráter diretor.

### 3. DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO

#### 3.1 ALGORITMO GENÉTICO

Para otimizar as características de radiação da antena ESPAR utilizou-se um algoritmo genético. Esta técnica de otimização é baseada nos princípios da genética e da seleção natural de Charles Darwin. O objetivo deste algoritmo é atingir uma geração com melhores características do que a anterior. A escolha deste algoritmo possibilita otimizar vários parâmetros da antena ESPAR, em simultâneo (Haupt & Haupt, 2004).

O processo de otimização dividiu-se em três partes, otimização da estrutura, otimização das reactâncias e dimensionamento do plano de terra.

#### 3.2 ESTRUTURA DIMENSIONADA

Na antena ESPAR, quanto maior o número de elementos parasitas, maior o número de variáveis e conseqüente maior complexidade. Optou-se por realizar uma ESPAR de 6 elementos, porque apresenta uma boa relação

entre a sua desempenho e complexidade. O raio dos monopolos utilizado é 0,75mm. Os elementos encontram-se dispostos sob a forma de um pentágono regular em torno do elemento ativo.

### 3.3 OTIMIZAÇÃO DAS REATÂNCIAS

No programa de simulação colocou-se na base de cada elemento parasita uma reatância. Neste as reatâncias foram variadas (valores positivos e negativos) por forma a atingir o diagrama de radiação com as características desejadas. Desta forma obtiveram-se as reatâncias ótimas a aplicar em cada um dos monopolos. O esquema elétrico apresentado na Figura 3 garante a variação da reatância em cada monopolo parasita através de um par de díodos varicap (Sun, Hirata, Ohira, & Karmakar, 2004).

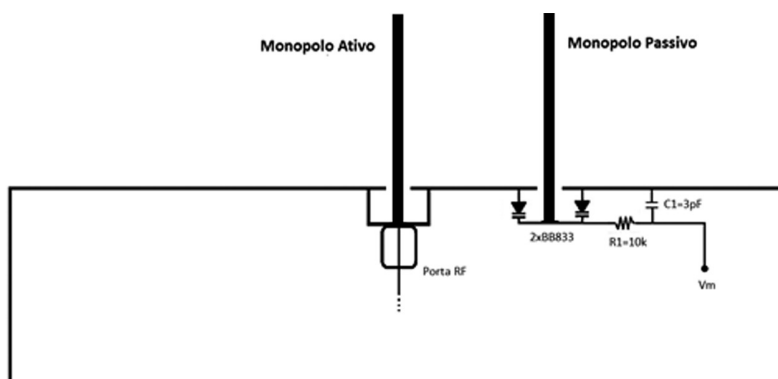


Figura 3. Circuito aplicado aos monopolos

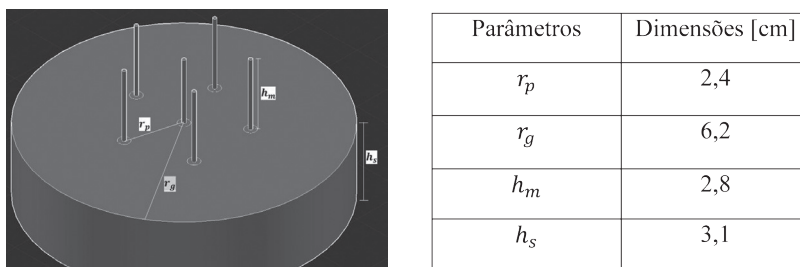
### 3.4 PLANO DE TERRA

O plano terra tem fundamental importância na realização da ESPAR. A utilização do plano de terra com aba garante uma solução mecanicamente adequada para proteção do mecanismo de controlo e dos componentes eletrónicos. A partir da antena otimizada anteriormente com um plano terra condutor perfeito, inseriu-se a mesma antena, num plano terra circular de cobre, de raio 6,2cm correspondente a  $0,5\lambda$ . Posteriormente inseriu-se uma aba com 3,1cm correspondente a  $0,25\lambda$ .

## 4. ESPAR DE 6 ELEMENTOS

### 4.1 PROJETO DA ANTENA

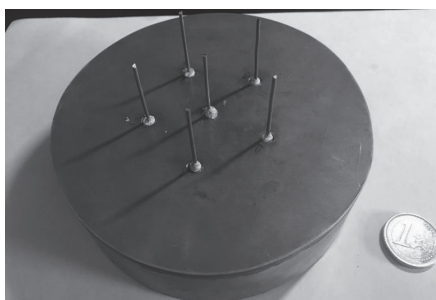
Antecedente à construção da antena desenhou-se a mesma de acordo com as dimensões otimizadas anteriormente. Este desenho foi realizado com o programa de desenho AutoCAD 2016, ferramenta que permite o desenho da antena em três dimensões. A Figura 4 apresenta a vista superior do desenho para a ESPAR de 6 elementos.



**Figura 4.** Layout antena ESPAR 6 elementos

### 4.2 ESTRUTURA BÁSICA

Na construção da estrutura básica necessitou-se uma placa de cobre com espessura 0,5mm. A partir desta foram cortados o plano de terra e a aba, e feita a solda dos mesmos. Posteriormente foram realizados os furos no plano de terra para colocar os monopolos. Com o objetivo de os fixar e garantir a imobilidade destes, foram soldados tubos de latão sob o plano de terra com as dimensões dos furos. Os monopolos encontram-se isolados do plano de terra. A Figura 5 apresenta a antena ESPAR após construção da estrutura básica.



**Figura 5.** Estrutura básica da antena

## 4.2 INCLUSÃO DOS COMPONENTES ELETRICOS

A inclusão da eletrônica foi baseada no circuito abordado no tópico 3.3. A Fig.6 apresenta o circuito associado a cada um dos monopolos. De referir que as dimensões dos componentes (diodos) são reduzidas, o que dificultou a solda dos mesmos. A ficha SMA (ao centro da imagem) foi soldada sob o monopolo ativo e os tubos de latão garantem a estabilidade dos monopolos.



**Figura 6.** Vista inferior da antena com componentes eletrônicos incluídos

A construção da antena foi realizada nos laboratórios do Instituto Superior Técnico (Complexo Interdisciplinar) com o auxílio do Professor Mata e do Engenheiro Dionísio. Este apoio revelou-se essencial para obter o protótipo com as melhores condições.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

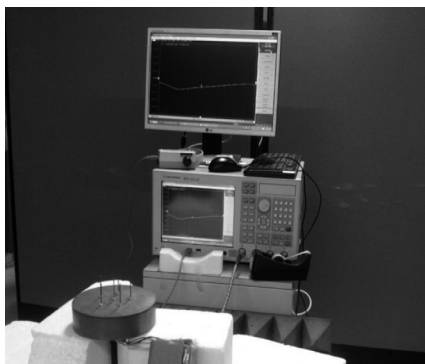
### 5.1 IMPEDÂNCIA DA ANTENA

Para efetuar a medida da Impedância da ESPAR utilizou-se um analisador de redes, da Agilent Technologies, que se encontra no laboratório de radiofrequência 2 do IST. Antes de realizar as medidas é necessário calibrar o equipamento, para diminuir o erro associado às medidas efetuadas com o protótipo. Em seguida fez-se a ligação à antena e efetuou-se o varrimento na frequência de 2 a 3 GHz.



## 5.2 MÓDULO DO COEFICIENTE DE ONDA ESTACIONÁRIA

O módulo do coeficiente de onda estacionária ( $|S_{11}|_{dB}$ ) também foi medido. Para efetuar as medições foi necessário utilizar novamente um analisador de redes. Efetuou-se o varrimento na frequência de 2 a 3 GHz.



**Figura 7.** Realização de medidas no laboratório de radiofrequência do IST

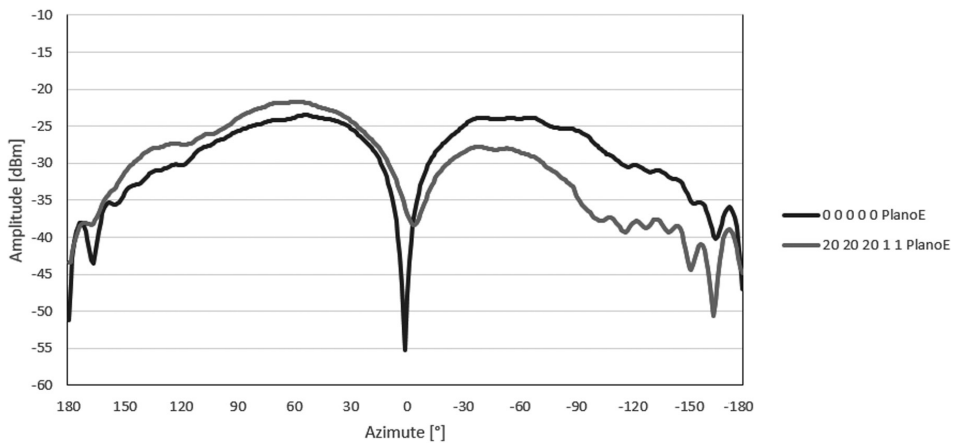
## 5.3 DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO

As medições experimentais dos diagramas de radiação no plano E e H foram realizadas na câmara anecóica da Área Científica de Telecomunicações do departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores do IST. Este ambiente permite controlar os efeitos de fading por multipercurso. As paredes da camara são revestidas por elementos de espuma constituídos por grafite, que garantem a absorção dos sinais que atingem as paredes.

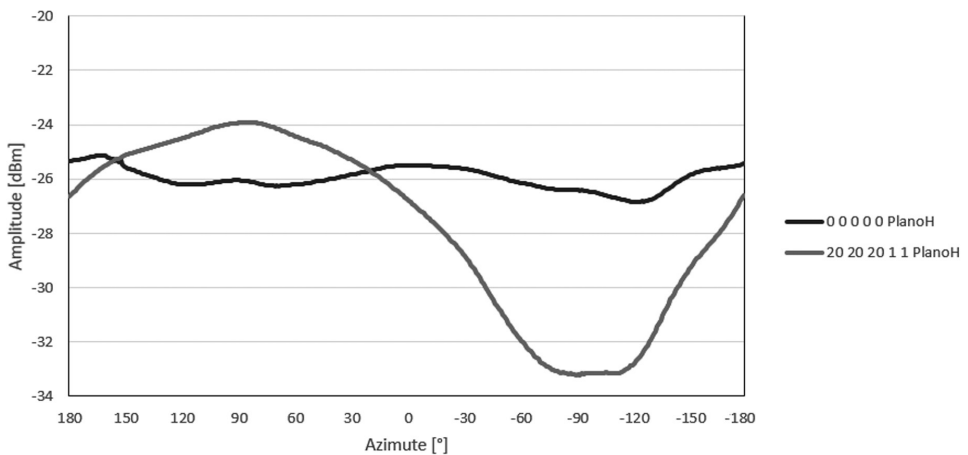


**Figura 8.** ESPAR fixa ao posicionador (câmara anecóica)

Efetuu-se a medição dos diagramas de radiação em duas situações distintas. Na primeira medição realizada não foi aplicada tensão nos monopolos parasitas. Nesta situação, de acordo com as simulações efetuadas é expectável a existência de um diagrama de radiação omnidirecional. Na segunda medição realizada aplicaram-se diferentes valores de tensão aos vários monopolos, de modo a variar o seu comprimento elétrico. Com a aplicação da combinação de tensões (20V, 20V, 20V, 1V, 1V) e de acordo com as simulações efetuadas, o diagrama de radiação deve adquirir uma característica diretiva. As Figura 9 e Figura 10 apresentam os diagramas de radiação no plano E e H, obtidos para as duas combinações mencionadas.



**Figura 9.** Diagrama de radiação no planoE



**Figura 10.** Diagrama de radiação no planoH

Através da análise dos diagramas de radiação no plano E e H, verifica-se que a curva azul no plano E, apresenta uma simetria em relação ao azimute  $0^\circ$ . A curva azul no diagrama do plano H apresenta uma reduzida variação ao longo de todo o azimute ( $\approx 2\text{dB}$ ). Conclui-se que na primeira medição se obteve um diagrama de radiação praticamente omnidirecional.

A curva de cor vermelha apresenta no plano E um máximo de radiação de ganho  $8,3\text{dB}$  na zona de azimute positivo. No plano H a curva vermelha apresenta um máximo a  $84^\circ$  e um mínimo na direção oposta. Conclui-se que na segunda medição se obteve um diagrama de radiação com características diretivas.

O Engenheiro António Almeida acompanhou-me durante a realização de todas as medições, sendo o seu apoio essencial.

## **6. CONCLUSÕES**

A realização prática da ESPAR de 6 elementos permitiu obter uma antena com características previstas em simulação e com as vantagens que lhe foram associadas previamente. A antena ESPAR permite comutar o diagrama de radiação em azimute. Esta vantagem associada à ESPAR revela importância, pois para além de ser uma antena direcional, permite variar a direção da radiação máxima para outra localização.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Os autores desejam agradecer aos Professores J.L. C. Mata, F. Marques Dias, Engenheiro I. Dionísio, e Engenheiro A. Almeida pelo auxílio e colaboração prestados na realização da antena, bem como nos testes efetuados nas câmaras anecoicas. Um agradecimento também ao Instituto de Telecomunicações na pessoa do Professor Carlos Fernandes, pelas facilidades de teste que nos foram prestadas.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Ministério da Defesa Nacional. (2012). Projecto de Investigação e Tecnologia em Veículos Aéreos Não-Tripulados (PITVANT). Obtido de defesa: <http://www.defesa.pt>

U.S. Department of Defense. (2013). Internet: <http://www.defense.gov>, consultado em [11 de Junho de 2016].

Martins, M. J., & Neves, I. V. (2015). Propagação e Radiação de Ondas Eletromagnéticas. Lisboa: LIDEL.

Harrington, R. (1978). Reactively Controlled Directive Arrays. *IEEE - Transactions on Antennas and Propagation*, Volume: 26, Issue: 3pp. 390-395.

Kalis, A., Kanatas, A., & Papadias, C. (2014). *Parasitic Antenna Arrays for Wireless MIMO Systems*. Springer.

Silva, A. (2015). *Modificação das Características de Radiação de uma Antena usando Componentes Eletrônicos*. Lisboa: IST-AM Dissertação de Mestrado.

Haupt, R., & Haupt, S. (2004). *Practical Genetic Algorithms*. New Jersey: Wiley- Interscience.

Sun, C., Hirata, A., Ohira, T., & Karmakar, N. C. (2004). Fast beamforming of electronically steerable parasitic array radiator antennas: Theory and experiment. *IEEE Trans. Antennas Propag.* Volume: 52, Issue: 7, July 2004 pp. 1819-1832.

Edgar Ruano is a Lieutenant from the Signal Corps of Portuguese Army. He holds a Master degree in Military Electrical Engineering from the Portuguese Military Academy.

Maria João Martins Completed the "Licenciatura" and Doctoral Degree, both at Instituto Superior Tecnico, Lisbon, where she taught as Professor in the Department of Electrical and Computer Engineering. She was an invited Professor in the Universities of Karlsruhe, Germany, (1992) and Rennes I, France (2004), She served as Expert-evaluator for the European Commission, in the 5th and 6th Framework Programs. She is since 2012 Professor in the Military Academy in Lisbon.

António Baptista Completed the "Licenciatura", Master and Doctoral Degree, at Instituto Superior Tecnico, Lisbon, where he has been teaching as Professor in the Department of Electrical and Computer Engineering to the present day.