



**HAL**  
open science

**Problématique de la modélisation des antennes  
imprimées sur substrat magnétique aimanté.  
Application à la conception d'antennes PIFA miniatures  
agiles en fréquence**

July Cortes, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier, Gregory Verissimo, Jean-Luc  
Mattei

► **To cite this version:**

July Cortes, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier, Gregory Verissimo, Jean-Luc Mattei. Problématique de la modélisation des antennes imprimées sur substrat magnétique aimanté. Application à la conception d'antennes PIFA miniatures agiles en fréquence. 19emes Journées Nationales Microondes 2015, Jun 2015, Bordeaux, France. pp.4. hal-01167303

**HAL Id: hal-01167303**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-01167303v1>**

Submitted on 24 Jun 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Problématique de la modélisation des antennes imprimées sur substrat magnétique aimanté. Application à la conception d'antennes PIFA miniatures agiles en fréquence.

July Paola CORTES-NIÑO<sup>1</sup>, Patrick QUEFFELEC<sup>1</sup>, Alexis CHEVALIER<sup>1</sup>, Grégory VERISSIMO<sup>1</sup>, Jean-Luc MATTEI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lab-STICC UMR 6295 – Université de Bretagne Occidentale, 6 Avenue le Gorgeu CS 93837, 29238 Brest Cedex 3  
July-Paola.Cortes@univ-brest.fr

### Résumé

Ce travail présente la conception et la réalisation d'une antenne patch accordable du type PIFA (Planar inverted F antenna). Cette antenne est implémentée sur un substrat composite magnéto-diélectrique. L'agilité en fréquence est contrôlée par l'application d'un champ magnétique statique qui influence fortement la perméabilité du matériau. Le modèle « General Permeability Tensor Model » (GPT) décrit la perméabilité tensorielle en fonction de la fréquence pour différents champs appliqués. La simulation électromagnétique (CST Microwave Studio®) de cette antenne tient compte de la description complète du tenseur issu du modèle GPT. La confrontation entre la mesure et la simulation pour différents champs appliqués permet de mettre en valeur le caractère prédictif du modèle.

### 1. Introduction

Dans le domaine des hyperfréquences, les ferrites présentent un grand intérêt pour leurs propriétés intrinsèques dans les dispositifs tels que les circulateurs, les isolateurs, les déphaseurs et les antennes [1]–[3].

Concernant ces dernières, l'implémentation de ferrite est utilisée pour la miniaturisation et l'agilité du dispositif. D'une part, la valeur relativement élevée de la perméabilité du ferrite dans le domaine des ondes décimétriques entraîne une réduction de la taille de l'antenne. D'autre part, la variation de la perméabilité en fonction de l'état d'aimantation permet une variation de sa réponse fréquentielle. En plus, l'utilisation des ferrites permet des améliorations des performances en termes de bande passante, agilité et contrôle sur le diagramme de rayonnement [2].

Il est donc primordial de disposer d'un outil théorique prédictif pour la phase de conception. Or à ce jour, aucun simulateur électromagnétique (EM) n'est en mesure de prédire l'évolution de la perméabilité du substrat lorsque son état d'aimantation change par application d'un champ statique de polarisation en vue d'assurer l'agilité de l'antenne. Lorsque le matériau magnétique est aimanté, sa perméabilité doit être représentée par un tenseur pour prendre en compte l'anisotropie du milieu.

Il existe dans la littérature plusieurs modèles de tenseur de perméabilité [4]–[6]. Or, ceux-ci sont limités à un seul état d'aimantation et ne sont pas prédictifs dans la mesure où ils ne prennent pas en compte le phénomène d'hystérésis propre aux matériaux ferro et ferrimagnétiques comme les ferrites ou les composites magnéto-diélectriques. Au laboratoire nous travaillons sur cette problématique depuis plusieurs années. Pour combler cette lacune qui rend difficile la conception de dispositifs hyperfréquences intégrant des matériaux magnétiques, nous avons développé un modèle appelé « General Permeability Tensor » (GPT)[7], [8]. Il décrit de façon rigoureuse le tenseur de perméabilité des ferrites polycristallins quels que soient l'intensité du champ magnétique statique appliqué et donc l'état d'aimantation du matériau.

Dans cette communication, nous présentons l'application de ce modèle à la conception d'une antenne agile PIFA. Cette topologie est avantageuse, car elle est relativement simple à mettre en œuvre pour des fonctionnalités de reconfigurabilité [9].

Cette antenne est implémentée sur un substrat ferrite de type céramique semi-dense constitué de particules nanométriques de ferrite de Ni-ZnCo. En effet, ces matériaux présentent des propriétés électromagnétiques qui en font d'excellents candidats pour la miniaturisation des antennes imprimées jusqu'à 700 MHz [3], [10]. En particulier, ils permettent d'éviter l'apparition de pertes élevées dans la bande UHF, liées à la relaxation des parois magnétiques, car la taille limitée des grains permet de garantir le caractère monodomaine des particules magnétiques.

Pour la simulation EM de notre antenne, nous intégrons le tenseur de perméabilité obtenu à partir du modèle GPT dans le logiciel commercial de simulation EM CST Microwave Studio. Grâce à cette association modèle GPT –logiciel CST, nous sommes en mesure d'étudier également l'agilité de l'antenne lorsque le champ magnétique externe appliqué varie en intensité.

Enfin, nous présentons le comportement simulé de l'antenne ainsi que son comportement mesuré sous l'influence de plusieurs intensités du champ de

polarisation. Cette confrontation est faite afin d'évaluer le caractère prédictif du modèle pour la modélisation des antennes miniatures agiles.

Le principe de la structure proposée est présenté ainsi que la description du modèle GPT utilisé pour la modélisation de la perméabilité tensorielle, et enfin les résultats de simulation et de mesure sont confrontés.

## 2. Conception de l'antenne PIFA

### 2.a. Structure de l'antenne

La structure de l'antenne représentée sur la Figure 1 est conçue pour fonctionner dans la bande UHF à une fréquence de résonance de 611 MHz.

L'antenne proposée est constituée d'un patch circulaire gravé sur un substrat tronqué. Son diamètre est de 38 mm et sa hauteur de 8 mm.

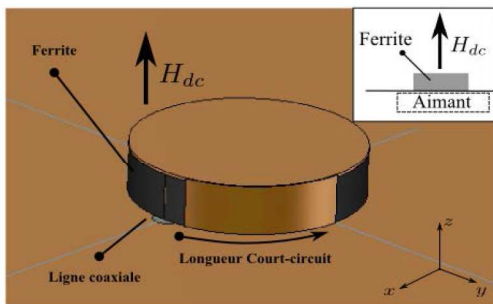


Figure 1 Topologie de l'antenne patch PIFA sur composite magnéto-diélectrique.

Cette antenne est basée sur le principe d'antennes PIFA. Ainsi, il existe un court-circuit entre l'élément rayonnant et la masse. Celui-ci est généralement placé à une distance optimisée entre le centre du patch et l'alimentation permettant d'accorder l'antenne à sa fréquence de résonance [11].

Pour cette étude et afin d'éviter l'usure du ferrite, le court-circuit est implémenté avec un ruban métallique placé sur le bord du substrat. Sa longueur est optimisée afin d'ajuster la fréquence de résonance.

De plus, l'alimentation de l'antenne est faite à l'aide d'un câble coaxial dont sa position a été optimisée. Elle est alors placée à un rayon de 18 mm du centre.

### 2.b. Matériau utilisé

Les particules de ferrite de Ni-Zn-Co utilisées pour réaliser le composite magnéto-diélectrique sont de composition chimique  $Ni_{0.5}Zn_{0.3}CO_{0.2}Fe_{1.98}O_4$  et sont synthétisées au Lab-STICC. Les particules sont de dimensions nanométriques (30nm), donc sans parois magnétiques. L'absence de pertes associées à la relaxation de parois est ainsi garantie.

La Figure 2 présente les propriétés EM du matériau employé. La caractérisation est effectuée par une méthode large bande basée sur l'utilisation d'une ligne coaxiale APC7. L'échantillon mesuré est de forme toroïdale et sa concentration en matière magnétique est proche de 60 %. La permittivité est évaluée autour de 7 tandis que la perméabilité statique est mesurée à un niveau de 4.5.

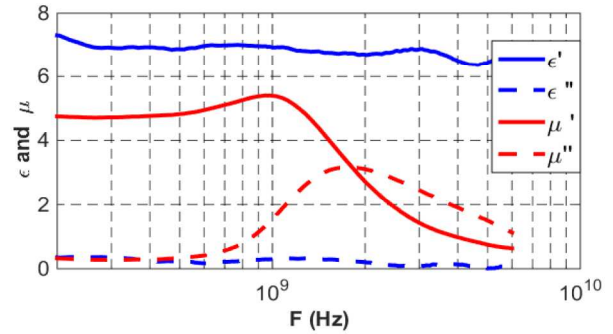


Figure 2 Parties réelles et imaginaires des spectres de permittivité et de perméabilité du composite à l'état désaimanté.

## 3. Modèle « General Permeability Tensor » (GPT)

Lorsqu'un champ magnétique statique de polarisation est appliqué selon l'axe Oz du repère cartésien, le comportement dynamique des ferrites est décrit par une perméabilité tensorielle qui prendra forme :

$$\vec{\mu} = \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix}$$

Où les composantes  $\mu$ ,  $\mu_z$  et  $\kappa$  sont des valeurs complexes et dépendantes de la fréquence et du champ statique appliqué.

Le modèle GPT [7] exprime chaque composante du tenseur en fonction de la fréquence pour un champ statique  $H_{dc}$  donné. Il s'appuie sur les caractéristiques physiques des ferrites; telles que  $M_s$  l'aimantation à saturation,  $\alpha$  le coefficient d'amortissement, le champ d'anisotropie  $H_a$  et le facteur de forme  $N_z$ .

Ce modèle repose sur une modélisation précise des propriétés statique et dynamique de ferrites polycristallins. L'étude statique permet la détermination du champ interne aux domaines magnétiques via le modèle Stonner et Wolfart [12]. Puis ce champ interne est utilisé pour déterminer le comportement dynamique régi par l'équation de Landau-Lifschitz-Gilbert (LLG) [13] appliquée à chaque domaine. Pour remonter à l'aimantation du matériau, une moyenne sur tous les domaines et grains possibles est effectuée, c'est-à-dire sur les directions des axes faciles ( $\varphi, \vartheta$ ) et les formes de grains et celles des domaines ( $n_d, n_g$ ).

Ce modèle permet donc de calculer le tenseur de perméabilité quelque soit l'état d'aimantation en tenant compte des interactions dynamiques entre domaines et entre grains adjacents (effet Polder-Smith), ainsi que de leurs distributions statistiques respectives en termes de forme. L'équation générale de l'aimantation macroscopique  $\vec{m}$ , lorsqu'une onde hyperfréquence  $\vec{h}$  interagit avec le milieu magnétique, est donnée par (1) [7]:

$$\langle \vec{m}(\vec{h}, H_{dc}) \rangle = \iiint \int P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \vec{m}_i \cdot dn_g \cdot dn_d \cdot d\vartheta \cdot d\varphi \quad (1)$$

Avec  $P_1$  la densité de probabilité pour l'orientation des axes de facile aimantation,  $P_2$  et  $P_3$  les densités de



probabilité des formes des grains et domaines, respectivement.

Afin de modéliser le matériau constitué de particules monodomaines, le modèle GPT a été modifié par rapport au modèle présenté [7] pour aussi prendre en compte le caractère hétérogène du matériau céramique semi-dense (ferrite + porosité) utilisé.

C'est pourquoi une nouvelle grandeur physique est prise en compte : la concentration  $C$  en matière magnétique dans le matériau semi-dense.

Puisque les grains du ferrite sont considérés monodomaines ( $P_3=0$ ), le modèle GPT prend en compte exclusivement l'effet du champ démagnétisant dynamique  $h_g$  qui est lié à la forme du grain  $n_g$ .

$$\langle \vec{m}(\vec{h}, H_{dc}) \rangle = C \cdot \int_{\vartheta} \int_{\varphi} \int_{n_{g\_min}}^{n_{g\_max}} P_1 \cdot P_2 \cdot \vec{m}_i dn_g d\vartheta d\varphi \quad (2)$$

De plus, à la différence de la réf. [7], la densité de probabilité sur la forme des grains  $P_2(n_g)$  est choisie de forme gaussienne. Celle-ci est caractérisée par sa valeur moyenne  $a$ , son écart type  $b$ , mais aussi par des limites d'intégration  $n_{g\_min}$  et  $n_{g\_max}$  écartant les formes extrêmes. Ainsi, 5 paramètres d'entrée sont rajoutés au modèle GPT.

Toutefois, les paramètres liés à la densité de probabilité  $P_2(n_g)$  ne sont pas physiquement complètement déterminés. Par conséquent, il est nécessaire de caractériser le ferrite dans un cas simple (état désaimanté) afin de définir les paramètres intrinsèques du modèle. Une fois ces paramètres définis, le modèle est en mesure de prédire les spectres de  $\mu$ ,  $\mu_z$  et  $\kappa$  quel que soit l'intensité du champ statique  $H_{dc}$  ou la forme macroscopique de l'échantillon  $N_z$ .

#### 4. Résultats de mesure

Pour la simulation EM de notre antenne, nous intégrons le tenseur de perméabilité obtenu à partir du modèle GPT dans le logiciel commercial CST Microwave Studio®. Cette intégration est effectuée grâce à l'utilisation d'une « macro » [14], qui permet la description d'un tenseur pour la perméabilité et la permittivité des matériaux anisotropes.

Grâce à cette association entre le modèle GPT et le logiciel CST, nous sommes en mesure d'étudier également l'agilité de l'antenne lorsque le champ  $H_{dc}$  varie.

Afin de trouver les spectres de  $\mu$ ,  $\mu_z$  et  $\kappa$  quel que soit la valeur de  $H_{dc}$ , les paramètres intrinsèques du modèle sont tout d'abord déterminés en utilisant la caractérisation du matériau lorsque  $H_{dc}=0$ . Les paramètres constitutifs (permittivité et perméabilité complexes) sont donnés Figure 2.

Par la suite, la confrontation entre la simulation et la mesure est présentée dans deux cas de figure. Dans un premier temps, nous présentons les résultats pour l'état désaimanté de l'antenne, c'est-à-dire pour une valeur de champ  $H_{dc}=0$ .

Ensuite, nous présentons des résultats pour des états d'aimantation partielle du substrat afin de prédire

l'agilité de l'antenne. Nous montrons la variation de la fréquence de résonance en fonction de l'intensité du champ magnétique statique appliqué ( $H_{dc} \neq 0$ ).

##### 4.a. Détermination des paramètres du modèle GPT

La détermination des paramètres intrinsèques du modèle GPT est faite par l'implémentation d'une routine de « fitting » liée au logiciel Matlab® et à partir de la perméabilité mesurée du matériau (Figure 2).

Les paramètres du modèle GPT qui permettent de retrouver la perméabilité mesurée du composite sont :  $4\pi M_s = 6000$  G,  $H_a = 114$  Oe,  $\alpha = 0.265$ ,  $N_z = 0.7$ ,  $C = 62\%$ ,  $n_{g\_min} = 0.1$ ,  $n_{g\_max} = 0.9$ ,  $a = 0.8$  et  $b = 0.9$ . La réponse obtenue est présentée sur la Figure 3.

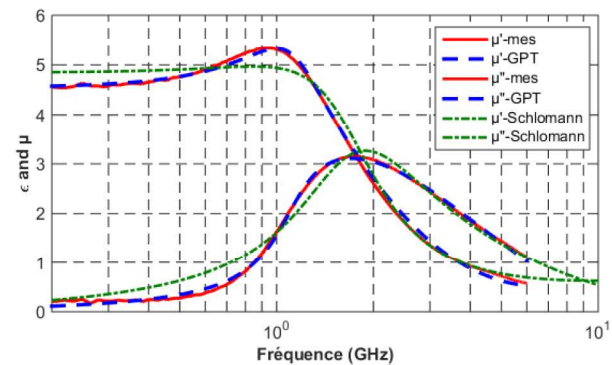


Figure 3 Confrontation mesure/théorie de la perméabilité avec différents modèles théoriques.

La Figure 3 montre aussi la meilleure concordance de la perméabilité trouvée avec notre approche par rapport à celle issue du modèle de Schlömann [4]. Ce modèle est généralement utilisé par les concepteurs d'antenne à l'état désaimanté. Ce modèle possède 3 paramètres d'entrée dont les valeurs obtenues par la routine de « fitting » sont  $4\pi M_s = 3988$  G,  $H_a = 666$  Oe,  $\alpha = 0.5355$ .

##### 4.b. Résultat pour l'état désaimanté

La Figure 4 montre la confrontation entre la simulation et la mesure de notre antenne patch PIFA dans le cas désaimanté pour les deux modèles : GPT et Schlömann.

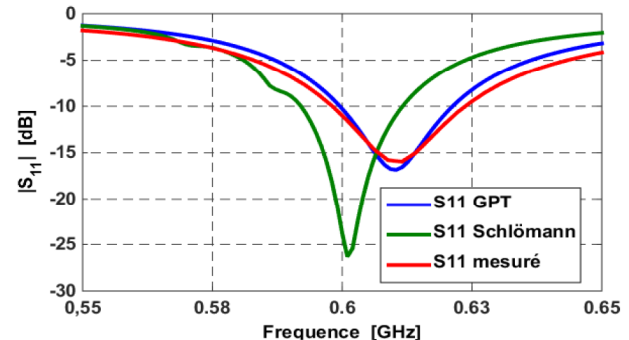


Figure 4 Confrontation simulation-mesure pour le coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le cas du ferrite désaimanté.

Il est constaté aussi sur la Figure 4 que l'antenne est adaptée à une fréquence de 611 MHz à -17 dB et présente une efficacité de 24.3%. Par ailleurs, la réponse obtenue avec le modèle GPT est en très bon accord avec la mesure de l'antenne alors que la réponse obtenue avec le modèle de Schlömann est décalée par rapport à la mesure. Ceci montre qu'il est indispensable d'utiliser un

modèle qui est capable de prédire la perméabilité mesurée des matériaux.

#### 4.c. Agilité en fréquence de l'antenne

Un champ magnétique statique  $H_{dc}$  suivant l'axe z est appliqué pour tester l'agilité de l'antenne proposée et son intensité varie de 0 à 4500 Oe en utilisant des aimants permanents. Ces aimants sont placés au-dessous du plan de masse, comme l'indique le dessin inséré dans la Figure 1.

La Figure 5 présente l'évolution du paramètre  $S_{11}$  mesuré de l'antenne pour les différentes intensités de  $H_{dc}$ .

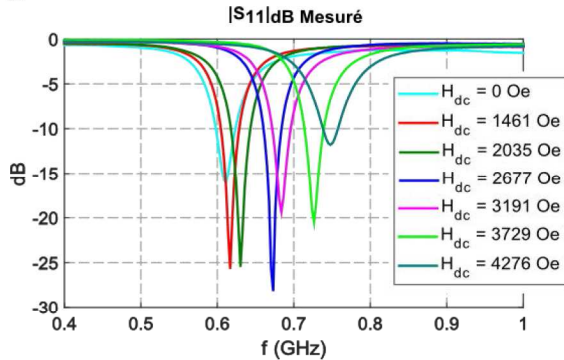


Figure 5 Evolution du  $S_{11}$  mesuré pour différents intensités de champ appliqué  $H_{dc}$ .

Les intensités du champ magnétique statique  $H_{dc}$  sont alors utilisées avec les paramètres intrinsèques du modèle (section 4.a) pour déterminer les spectres de  $\mu$ ,  $\mu_z$  et  $\kappa$  en utilisant le modèle GPT. Ces spectres sont alors introduits dans CST à l'aide de la « macro » pour la simulation EM de l'antenne.

La Figure 6 montre l'évolution de la fréquence de fonctionnement de l'antenne en fonction du champ magnétique appliqué pour la réponse simulée et la réponse mesurée.

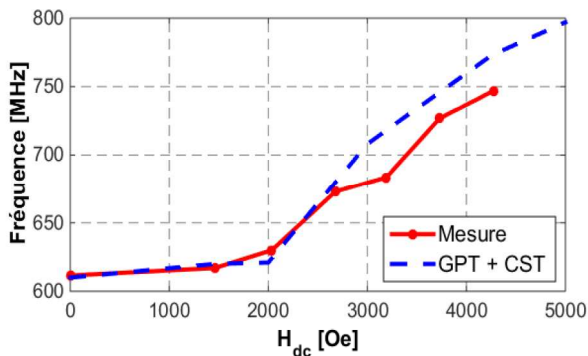


Figure 6 Évolution fréquentielle simulé et mesuré de la fréquence de résonance de l'antenne en fonction de l'intensité du champ statique appliqué.

L'évolution de la fréquence de résonance simulée suit le comportement général de celle mesurée, principalement pour des champs appliqués inférieurs à 3000 Oe. Il est toutefois noté des décalages par rapport à la mesure pour des champs forts. Ces décalages sont probablement liés à l'incertitude sur la mesure du champ magnétique créé par l'aimant.

Cette confrontation théorie/expérience (Figure 6) prouve le caractère prédictif du modèle GPT. Ceci indique aussi que la détermination de paramètres

intrinsèques du modèle à l'état désaimanté est suffisante pour prédire la perméabilité tensorielle du composite quel que soit le champ de polarisation  $H_{dc}$ .

## 5. Conclusion

Cette communication souligne l'intérêt d'un outil prédictif pour la conception des antennes imprimées sur substrat magnétique aimanté. L'outil proposé comprend l'intégration du modèle GPT adapté aux matériaux composites dans le simulateur commercial CST®.

Le caractère prédictif du modèle GPT est mis en évidence dans cette étude pour la phase de conception. Ce modèle apporte des avantages par rapport aux autres modèles théoriques dans la modélisation des matériaux magnétiques. En effet, il décrit rigoureusement le comportement statique et dynamique des ferrites, et cela quel que soit leur état d'aimantation.

De plus, une seule caractérisation du matériau à l'état désaimanté est suffisante pour modéliser de façon prédictive des matériaux composites soumis à l'effet d'un champ magnétique de polarisation.

## 6. Bibliographie

- [1] A. Guennou, «Etude Magnétostatique et Electromagnétique de Circulateurs Miniatures pour les Modules Actifs Emission/Réception des Systèmes de Télécommunications.», Université de Bretagne occidentale-Brest, 2007.
- [2] A. D. Brown, J. L. Volakis, L. C. Kempel, y Y. Y. Botros, «Patch antennas on ferromagnetic substrates», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, n.° 1, pp. 26-32, ene. 1999.
- [3] L. Huitema, T. Reveyrand, J.-L. Mattei, E. Arnaud, C. Decroze, y T. Monediere, «Frequency Tunable Antenna Using a Magneto-Dielectric Material for DVB-H Application», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, n.° 9, pp. 4456-4466, sep. 2013.
- [4] E. Schlömann, «Behavior of ferrites in the microwave frequency range», *J. Phys. Colloq.*, vol. 32, n.° C1, feb. 1971.
- [5] D. Polder, «On the theory of ferromagnetic resonance», *Physica*, vol. 15, n.° 1-2, pp. 253-255, abr. 1949.
- [6] J. J. Green y F. Sandy, «Microwave Characterization of Partially Magnetized Ferrites», *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 22, n.° 6, pp. 641-645, juin 1974.
- [7] P. Gelin y P. Queffelec, «Generalized Permeability Tensor Model: Application to Barium Hexaferrite in a Remanent State for Self-Biased Circulators», *IEEE Trans. Magn.*, 2008.
- [8] P. Gelin, P. Queffelec, y F. Le Pennec, «Effect of domain and grain shapes on the dynamical behavior of polycrystalline ferrites: Application to the initial permeability», *J. Appl. Phys.*, 2005.
- [9] T. D. Nguyen, T.-P. Vuong, Y. Duroc, y V. Y. Vu, «Antenne PIFA reconfigurable avec patch de géométrie variable et commandable», *Journées Nationales Microondes*, France, 2011.
- [10] J.-L. Mattei, E. Le Guen, A. Chevalier, y A.-C. Tarot, «Experimental determination of magneto-crystalline anisotropy constants and saturation magnetostriction constants of NiZn and NiZnCo ferrites intended to be used for antennas miniaturization», *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 374, pp. 762-768, ene. 2015.
- [11] *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House, 2001.
- [12] E. C. Stoner y E. P. Wohlfarth, «A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Alloys», *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 240, n.° 826, pp. 599-642, abr. 1948.
- [13] L. Landau y E. Lifshitz, «On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies», *Phys Z Sowjetunion*, vol. 8, n.° 153, pp. 101-114, 1935.
- [14] A. Le Gouellec, G. Verissimo, P. Queffelec, V. Laur, I. Albert, y T. Girard, «Ferrite-based phase shifters design: The modeling problem of non-saturated anisotropic ferrites», en *Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International*, 2013, pp. 1-4.