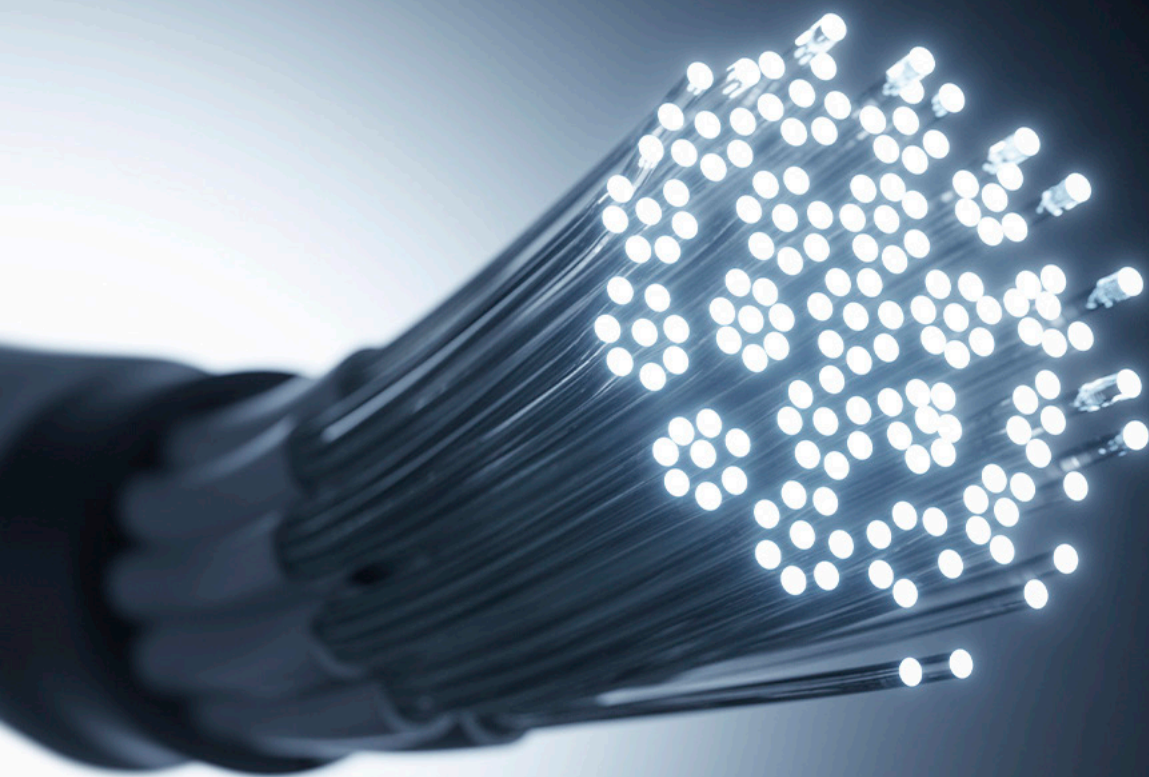


COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA 2

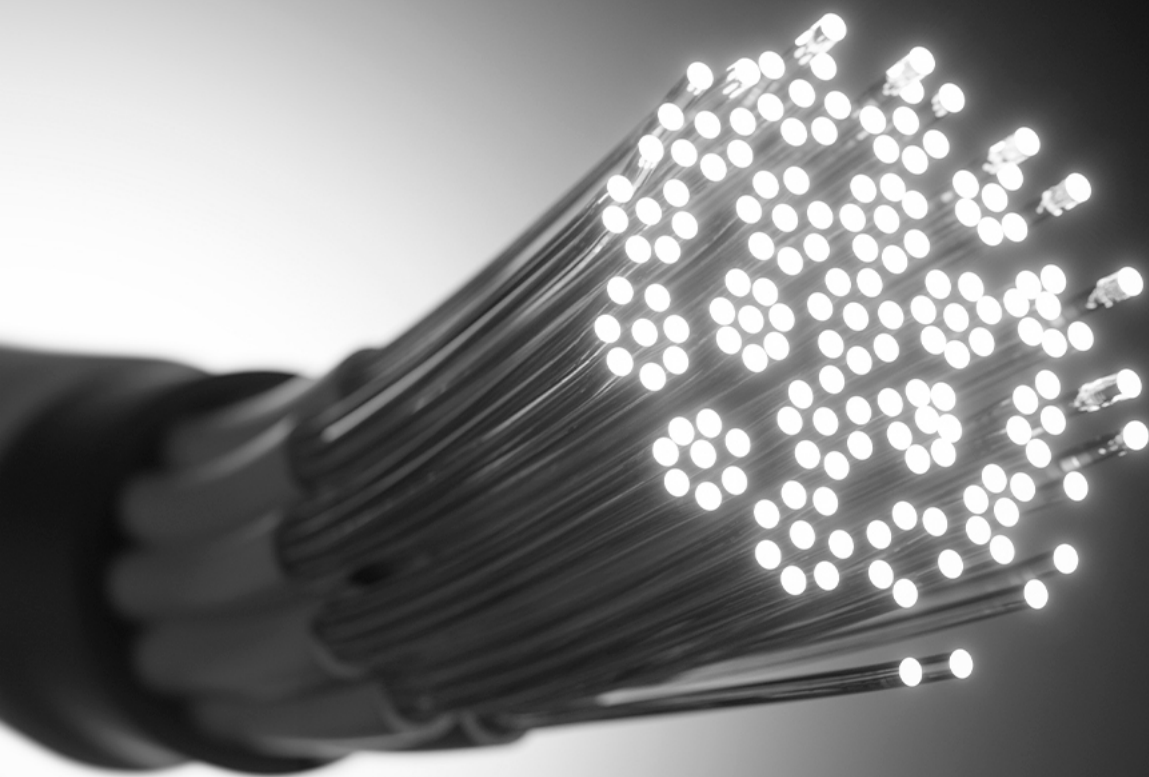


JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)

  
Atena  
Editora  
Ano 2021

COLEÇÃO  
**DESAFIOS**  
DAS  
**ENGENHARIAS:**

**ENGENHARIA ELÉTRICA 2**



JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)

  
Atena  
Editora  
Ano 2021

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

**Diagramação:** Daphynny Pamplona  
**Correção:** Flávia Roberta Barão  
**Indexação:** Gabriel Motomu Teshima  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica 2 /  
Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz  
Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-556-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.560211910>

1. Engenharia elétrica. I. Dallamuta, João  
(Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III.  
Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access, desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

## APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é portando pesquisar em uma gama enorme de áreas, subáreas e abordagens de uma engenharia que é onipresente em praticamente todos os campos da ciência e tecnologia.

Neste livro temos uma diversidade de temas, níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann




## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

PHOTODETECTOR OPTIC POWER OPTIMIZATION TO INCREASE THE GAIN ON SUB-OCTAVE MICROWAVE PHOTONIC LINK


Naiara Tieme Mippo  
Paulo Henrique Kiohara Acyoli Bastos  
Felipe Streitenberger Ivo  
Olympio Lucchini Coutinho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119101>

### **CAPÍTULO 2..... 14**

OPTOELECTRONIC SENSOR APPLIED TO FLOW RATE MEASUREMENTS ON OIL AND GAS INDUSTRY

Alexandre Silva Allil  
Fabio da Silva Dutra  
Cesar Cosenza de Carvalho  
Regina Célia da Silva Barros Allil  
Marcelo Martins Werneck

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119102>

### **CAPÍTULO 3..... 25**

ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO, PRECISÃO E EXATIDÃO EM SENSOES ÓTICOS FBG E RFBG QUE MEDEM TEMPERATURAS ENTRE 5 °C E 60 °C POR 16 SEMANAS


Karoline Akemi Sato  
Camila Carvalho de Moura  
Antonio Carlos Ribeiro Filho  
Luis Camilo Jussiani Moreira  
Valmir de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119103>

### **CAPÍTULO 4..... 38**

EVALUACIÓN PARA INVERSIÓN CON OPTIMIZACIÓN DE SECCIÓN CONDUCTOR Y TENSIÓN DE DISTRIBUCIÓN. APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DEL LEY DE KELVIN


Christian Arturo Ramirez Osorio  
Enrique Buzarquis  
Rodney Damián Fariña Martínez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119104>

### **CAPÍTULO 5..... 55**

STRATEGIES OF VOLTAGE CONTROL BASED IN FUZZY LOGIC ALGORITHMS WITH ALTERNATIVE, CLEAN AND RENEWABLE GENERATION OPERATING WITH ANOTHER CONVENTIONAL ELECTRIC GENERATION IN WITH RADIAL LOADS IN POWER SYSTEMS STABILITY


Rodney Damián Fariña Martínez  
Antonio Carlos Zambroni de Souza  
Eliane Valença Nascimento de Lorenci

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119105>

**CAPÍTULO 6..... 72**

ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E ELETROMECAÑICOS” DA ENERGIZAÇÃO DA LT 500KV AYOLAS-VILLA HAYES SEM REATOR DESDE A CENTRAL HIDRELÉTRICA ITAIPÚ


Elisandro Rodriguez Buzarquis  
Rodney Damián Fariña Martínez  
Antônio Carlos Zambroni de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119106>

**CAPÍTULO 7..... 86**

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR MEIO DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE COM METAMATERIAIS CONVENCIONAIS E SUPERCONDUTORES


Arthur Henrique de Lima Ferreira  
Lucas Douglas Ribeiro  
Rose Mary de Souza Batalha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119107>

**CAPÍTULO 8..... 96**

DEGRADAÇÃO POR POTENCIAL INDUZIDO (PID): REVISÃO


Hellen Ferreira Barreto Miranda  
Luan Peixoto da Costa  
Stefhany Oliveira Soares  
Jonathan Velasco da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119108>

**CAPÍTULO 9..... 108**

CAPACITOR BANK ALLOCATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS USING THE DISCRETE PSO ALGORITHM


Luís Henrique Chouay Dall’ Agnese  
Carlos Roberto Mendonça da Rocha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119109>

**CAPÍTULO 10..... 119**

DESIGN OF A TRANSMISSION-LINE METAMATERIAL WITH A NEGATIVE INDEX OF REFRACTION AT S-BAND

Lucas Douglas Ribeiro  
Juscelino Júnior de Oliveira  
Arthur Henrique de Lima Ferreira  
Rose Mary de Souza Batalha


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191010>

**CAPÍTULO 11..... 129**

RADIO PROPAGAÇÃO E MODELAGEM PARA UMA PONTE SOBRE O RIO TOCANTINS

## PARA LTE


Alaim de Jesus Leão Costa  
Thiago Eleuterio da Silva  
Diego Kasuo Nakata da Silva  
Leslye Estefania Castro Eras

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191011>

## **CAPÍTULO 12..... 141**

### **TESTES DE IMUNIDADE CONTRA SURTOS ELÉTRICOS EM ELETRODOMÉSTICOS**


Gustavo Oliveira Cavalcanti  
Marcílio André Félix Feitosa  
Kayro Félyx Henrique Pereira  
Manoel Henrique da Nóbrega Marinho  
Antonio Samuel Neto  
Lucas de Carvalho Sobral  
Pollyana Maria Ramos Gonçalves  
Douglas Thiago Moreira Lara  
Thiago Francisco Gomes  
Renato Jardim Teixeira  
Wagner Almeida Barbosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191012>

## **CAPÍTULO 13..... 152**

### **AUTOMAÇÃO DA ILUMINAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES - O SISTEMA DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO DALI: UM ESTUDO DE CASO**


Marcos Noboru Kurata  
Ênio Carlos Segatto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191013>

## **CAPÍTULO 14..... 163**

### **INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E CONSTRUTIVAS NO EIXO DO ROTOR EÓLICO**

Leonardo Pavan  
Evandro André Konopatzki  
Cristiane Lionço de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191014>

## **CAPÍTULO 15..... 172**

### **VIABILIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO NA REGIÃO DO RECÔNCAVO DA BAHIA**

Gabriel Garcia Bastos de Almeida  
Luanna Valéria Sousa Fonseca  
Andréa Jaqueira da Silva Borges

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191015>

## **SOBRE OS ORGANIZADORES ..... 183**

## **ÍNDICE REMISSIVO..... 184**

## DESIGN OF A TRANSMISSION-LINE METAMATERIAL WITH A NEGATIVE INDEX OF REFRACTION AT S-BAND

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: 30/07/2021

### Lucas Douglas Ribeiro

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,  
Graduate Program in Electrical Engineering  
Belo Horizonte, Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0002-0230-8899>

### Juscelino Júnior de Oliveira

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,  
Graduate Program in Electrical Engineering  
Belo Horizonte, Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0003-2364-4741>

### Arthur Henrique de Lima Ferreira

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,  
Graduate Program in Electrical Engineering  
Belo Horizonte, Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0002-8018-6823>

### Rose Mary de Souza Batalha

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,  
Graduate Program in Electrical Engineering  
Belo Horizonte, Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0002-6157-1574>

**ABSTRACT:** A metamaterial based on a two-dimensional transmission-line network loaded with inductors and capacitors enabling to achieve negative-refractive-index (NRI) is developed. The dispersion characteristics are calculated by their equivalent circuit model and an operating frequency of 2.95 GHz in which there is impedance matching with free space is chosen in the S-Band. This NRI metamaterial supports transverse electric (TE) waves, thus it can be

used in applications such as lensing.

**KEYWORDS:** Composite Right/Left-Handed (CRLH); left-handed media (LHM), metamaterials, negative permeability, negative permittivity, negative refractive index, periodic structures.

### PROJETO DE UM METAMATERIAL BASEADO EM PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM ÍNDICE DE REFRAÇÃO NEGATIVO NA BANDA S

**RESUMO:** Foi desenvolvido um metamaterial baseado em parâmetros de linha de transmissão bidimensional carregada com indutores e capacitores que permite obter índice de refração negativo (do inglês, negative refractive index, NRI). As características de dispersão são calculadas por meio do modelo de circuito equivalente e a frequência de operação de 2,95 GHz na qual há casamento impedância com o espaço livre é escolhida na banda S. Este metamaterial NRI suporta ondas transversais eléctricas (TE), portanto, pode ser usado em aplicações como lentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Composto Direito/Esquerdo (CRLH); meio Esquerdo (LHM), metamateriais, permeabilidade negativa, permissividade negativa, índice de refração negativo, estruturas periódicas.

## 1 | INTRODUCTION

In 1968, Veselago investigated materials with simultaneously negative permittivity and permeability, due to the reversal of the Snell's law, negative phase velocity, and some

other electrodynamic properties, they are known as left-handed materials (LHM). These metamaterials (MMs) are artificial composites characterized by subwavelength features and effective negative value of the refractive index (NRI). LHMs can be applied to optical and microwave applications, including beam steerers, modulators, band-pass filters, microwave couplers, antenna radomes, and superlenses [1], [2]. As Pendry proposed in 2000 [3], the application of MM lensing, which avoids the diffraction limit by utilizing both periodic and evanescent electromagnetic waves, further increased the interest for NRI MMs.

Whereas the split-ring resonators (SRRs) and thin wires were the first realizations of LHMs [4] based on a periodic array of interspaced conducting nonmagnetic split ring resonators and continuous wires, that exhibits a frequency region in the microwave regime with simultaneously negative values of effective permeability  $\mu_{\text{eff}}$ , the first MM lens in planar form using the NRI transmission-line (NRI-TL) approach was achieved by [5]. In that work, a host TL is loaded using lumped shunt inductors and series capacitors that, respectively, create the conditions for an effective NRI.

The TL MMs can be used in many applications, which include electrically small antennas, subwavelength resonators, guided wave applications, phase compensators, LTE antennas, radar applications [6], superconductors [7] and perfect lens, and superlens [8]

Some developments of volumetric arrays of NRI-TL metamaterials that interact efficiently with free space were achieved in [9], [10] and led to the experimental demonstration of free space NRI lens [8]. The free space metamaterial lens development in [11] allows electromagnetic waves to focus into a focal region. The designed lens employs a multilayer geometry of unit cells that are loaded using fully printed capacitors and inductors in a substrate.

A similar development is done in this work. We propose to design a transmission-line (TL) network periodically loaded using discrete (surface-mounted) inductors and capacitors. The TL is modeled by a metamaterial unit cell using circuit theory, and an operating frequency of 2.95 GHz at S-Band, in which there is impedance matching with free space, is chosen. The unit cell size is approximately 11 times smaller than the wavelength, which is sufficient to consider it as an effective medium. The equation for the dispersion relation is compared with the simulation results to analyze the metamaterial behavior.

The behavior of an NRI-TL metamaterial in the GHz frequency is studied in this paper. Section II presents the metamaterials theory based on transmission line parameters. In Section III, the simulation of a unit cell is shown. The Conclusion is in Section VI.

## 2 | METAMATERIALS BASED ON TRANSMISSION LINE PARAMETERS

Metamaterials can be defined as artificial structures of natural elements that when correctly arranged can exhibit unnatural behavior. When they have an average cell size much smaller than the wavelength, they become effectively homogeneous structures. Thus, the refractive phenomenon can overlap the diffraction and scattering in MMs when there is wave

propagation.

It is possible to separate the MMs into two groups: resonant and non-resonant. The most common resonant is the Split Ring Resonator. In the group of non-resonant, we have the metamaterials modeled by transmission line theory, also called TL metamaterials [12].

The non-resonant metamaterial, also found in the literature as CRLH (Composite Right/Left-Handed), do not rely on resonances to provide negative parameters, thus obtaining lower ohmic losses and larger bandwidth when compared with the resonant metamaterials [5], [13]. The TL MMs can be used in two configurations: shunt and series [9], [14].

Any natural dielectric can be modeled by an electric circuit composed by a series inductance and a shunt capacitance, which are directly related to the material parameters permeability and permittivity. This theory, a circuit of unit cell size  $d$  with shunt inductance and a series capacitance, is used to model a TL metamaterial and obtain negative parameters.

A traditional transmission line can be used as the host to implement a material with negative parameters, together with loading elements as inductors and capacitors. An example of this configuration is the microstrip line that can be made in shunt and series configurations [9]. There are two co-planar strip lines on the top of a substrate in the series topology, and there is no ground plane. In the shunt configuration [15], the stripline is on top of the substrate and the ground plane on the bottom. These two configurations are shown in Fig. 1.

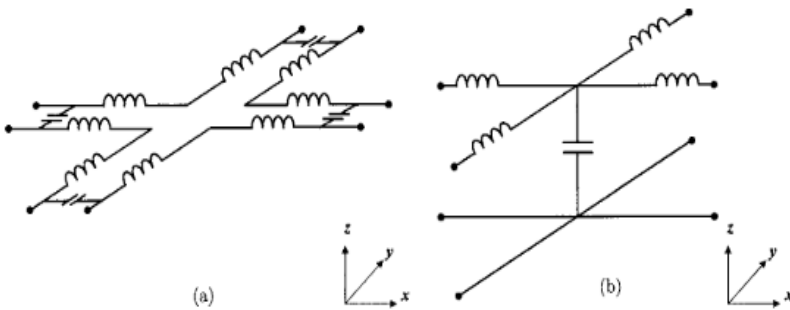


Fig. 1 - Transmission line host topologies. (a) Series. (b) Shunt [9].

The series configuration is shown in Fig. 1 (a). It can be seen as the connection of four transfer-matrices, which relates the input and output terminal voltages and currents of a two-port network. The connected transfer-matrices are shown in Fig. 2.

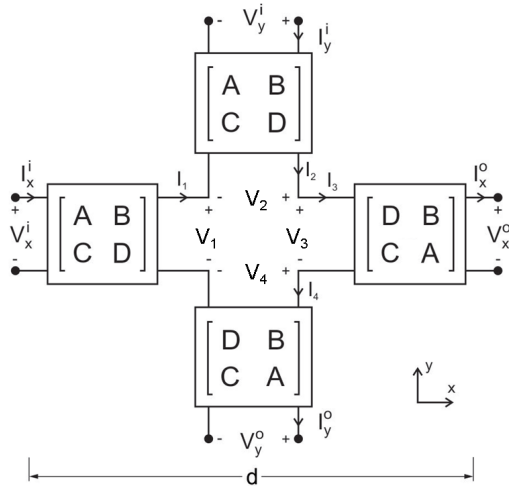


Fig. 2 - Block diagram for the series unit cell.

Every arm of Fig.2 is a block represented by its transmission matrix and presents the following relations:

$$\begin{aligned} V_x^o &= V_x^i e^{-j\beta_x d} & I_x^o &= I_x^i e^{-j\beta_x d} \\ V_y^o &= V_y^i e^{-j\beta_y d} & I_y^o &= I_y^i e^{-j\beta_y d} \end{aligned} \quad (1)$$

Where  $\beta$  is the phase delay over the cell dimension  $d$ . Due to the symmetry of the circuit, the transmission matrix is inverted in the output side.

The series impedance  $Z = j(\omega L_R - 1/(\omega C_L))$  and the shunt admittance  $Y = j(\omega C_R - 1/(\omega L_L))$  can compose the circuit of each loaded block, where  $L_R$  and  $C_R$  represent the natural characteristic of the strip lines, also called host line elements, and  $L_L$  and  $C_L$  are the loading elements.

The circuit of the loaded block can be seen in Fig. 3.

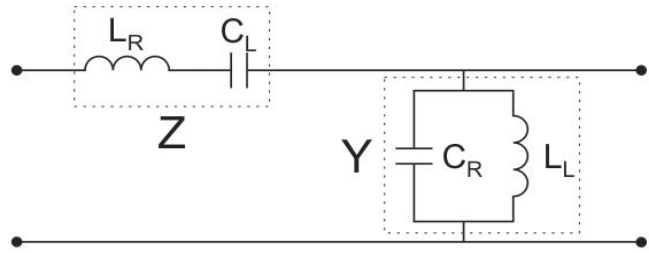


Fig - 3. Circuit model of one block.

Before obtaining the values of the terms  $L_R$  e  $C_R$ , it is necessary to calculate the effective permittivity  $\epsilon_{eff}$  of the medium. Considering a stripline with lands of width  $w$  separated by a distance  $s$ , on a substrate with relative permittivity  $\epsilon_r$ , a height  $h$ , and

surrounded by air with permittivity  $\epsilon_0$ . As discussed in [16], it can be considered that the same stripline is surrounded by a single dielectric with an effective permittivity  $\epsilon_{eff}$ , as shown in Fig. 4.

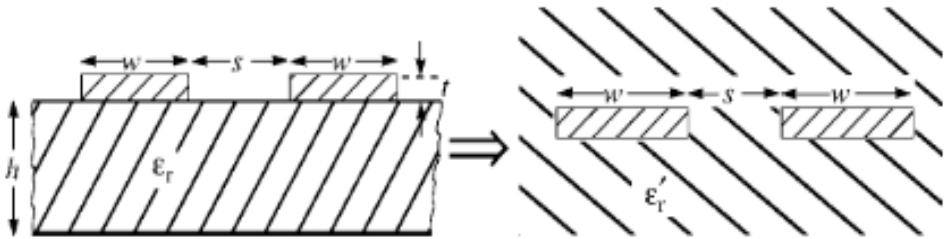


Fig. 4. Effective permittivity [16].

Then, effective permittivity can be calculated by:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left\{ \tanh \left[ 0,775 \ln \left( \frac{h}{w} \right) + 1,75 \right] + \frac{kw}{h} [0,04 - 0,7k + 0,01(1 - 0,1\epsilon_r)(0,25 + k)] \right\} \quad (2)$$

where  $k = s / s + 2w$ .

The values of  $L_R$  and  $C_R$  can be obtained from:

$$L_R = \begin{cases} \frac{120d}{v_0} \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} \right), & \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1 \\ \frac{377\pi d}{v_0 \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right)}, & 0 \leq k \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_R = \begin{cases} \frac{\epsilon_{eff} d}{120v_0 \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} \right)}, & \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1 \\ \frac{\epsilon_{eff} d \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right)}{377\pi v_0}, & 0 \leq k \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

where  $k' = \sqrt{1 - k^2}$  e  $v_0$  is the speed of light in a vacuum.

The transmission matrix coefficients can be defined as:

$$A = ZY + 1 \quad B = Z \quad C = Y \quad D = 1 \quad (4)$$

Through the circuit theory in the diagram of Fig.2, it is possible to get the following equations:

$$\begin{aligned} V_1 &= DV_x^i - BI_x^i & I_1 &= -CV_x^i + AI_x^i \\ V_2 &= DV_y^i - BI_y^i & I_2 &= -CV_y^i + AI_y^i \\ V_3 &= DV_x^o - BI_x^o & I_3 &= CV_x^o + AI_x^o \\ V_4 &= DV_y^o - BI_y^o & I_4 &= CV_y^o + AI_y^o \\ 0 &= V_1 + V_2 - V_3 - V_4 & I_1 &= I_2 = I_3 = I_4 \end{aligned} \quad (5)$$

After solving (1) and (5):



$$[M] \times \begin{bmatrix} V_x^i \\ I_x^i \\ V_y^i \\ I_y^i \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

$$[M] \times \begin{bmatrix} C + Ce_x & Ae_x - A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C + Ce_y & Ae_y - A \\ Ce_x & Ae_x & C & -A \\ D - De_x & -B - Be_x & D - De_y & -B + Be_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

Where  $e_x = e^{-j\beta x d}$  and  $e_y = e^{-j\beta y d}$ . The dispersion relation shows the behavior of MM as a function of frequency. This relation can be found by solving:

$$\det(M) = 0 \quad (8)$$

For simplicity, only axial propagation in the x-direction will be considered, so that there is no delay in the y-direction and  $\beta_y$ . After solving (8) and simplifying it, the dispersion relation is:

$$\beta d = \arccos(1 + 4BC) \quad (9)$$

### 3 | SIMULATION OF A UNIT CELL

The software CST Studio Suite® was used to simulate a unit cell, according to the theory developed in the previous section. A comparison between the dispersion relation generated by theory and simulation is made. The simulation also provides the material parameters that can be used in the development of the complete system.

The values of the host line elements,  $L_R$  and  $C_R$ , are dependent on the unit cell dimensions and material. The loading elements  $L_L$  and  $C_L$  can be freely selected. It is important to stick to the matching condition with free space that is achieved when  $\epsilon_R = -1$  and  $\mu_R = -1$ , culminating in a negative refractive index  $n = -1$  and a characteristic impedance  $Z = 377\Omega$ . The cell size must be small when compared to the wavelength used, in this case, approximately 11 times smaller.

The free space matching condition can be achieved by many L and C parameter combinations. These values were defined by iterative calculations. In Fig. 5 (a), the top view of the simulated unit cell can be seen. The substrate material is Rogers RO3003 with  $\epsilon_R = 3$  and height  $h = 1.54$  mm.

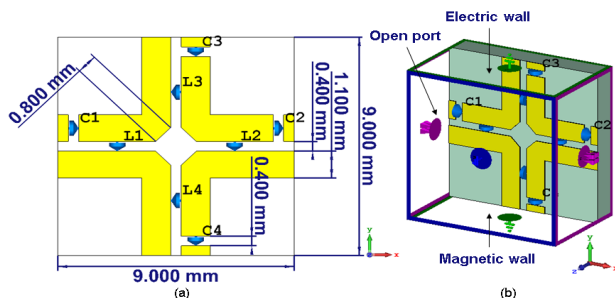


Fig. 5. (a) Top view of the simulated unit cell with main dimensions. (b) Boundaries conditions used in the simulation.

The host line elements were obtained for each block using the main dimensions and referring to [16], [17]. Furthermore, there is no ground below the substrate. Then we have  $L_R = 2.73 \text{ nH}$  and  $C_R = 0.16 \text{ pF}$ , and the loading elements selected are  $C_L = 0.6 \text{ pF}$  and  $L_L$ . To reduce reflection, the 90-degree bends were mitered.

To simulate the system is necessary to impose boundary conditions, as shown in Fig. 5 (b). These conditions are imposed to simulate the neighboring unit cells by keeping the behavior of the field as if the unit cell were in the full model. Through two waveguide ports, the unit cell of Fig. 5 was simulated with the propagating wave passing along the x-axis.

The dispersion relation was drawn and the S-Parameters were retrieved, as shown in Fig. 6, along with the dispersion relation calculated with (9). Considering the frequency range of the left-handed (LH) region, between 1.85 and 3.39 GHz, the difference between the calculated and simulated curves is 11.9%. The LH region shaded in gray is where backward waves and negative refractive index occur. The matching point with free space at 2.95 GHz is indicated by the intersection point with the light line.

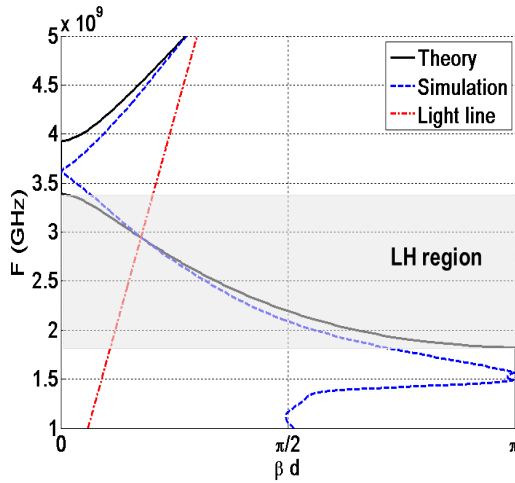


Fig. 6. Dispersion relation found by theory and by simulation.

Through the simulation, the unit cell parameters of permittivity  $\epsilon$ , permeability  $\mu$ , refractive index  $n$  and the impedance relative to the characteristic impedance of free space  $z$  were extracted, as shown in Fig. 7. The intersection point with the light line indicates the matching point frequency with free space at 2.95 GHz given by the dispersion relation of Fig. 6.

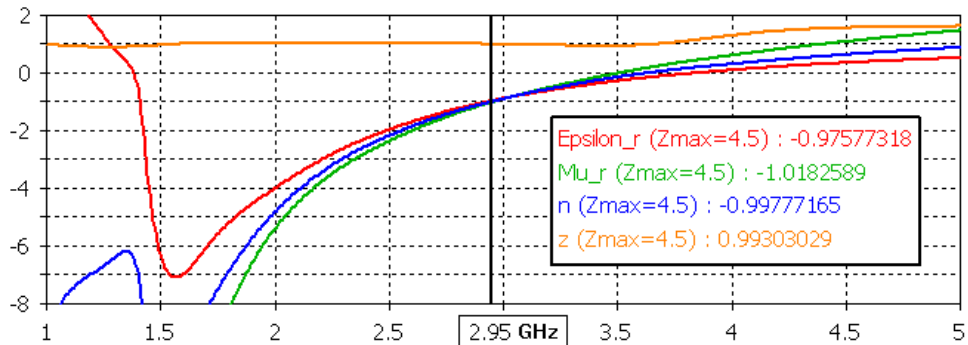


Fig. 7. Unit cell parameters extracted from simulation.

## 4 | CONCLUSION

In this work, a transmission-line (TL) network periodically loaded using inductors and capacitors was modeled by a metamaterial unit cell using circuit theory. The discrete capacitor and inductors enabled stronger loading than with fully printed ones. A unit cell size smaller than  $\lambda_0/11$  allowed the use of effective medium theory in this model. The equation for the disper-

sion relation was validated by simulations and used to analyze the metamaterial behavior. The simulations confirmed the NRI and impedance matching to free space at the operating frequency of 2.95 GHz at the S-Band. A structure using the unit cells in the shape of a lens with fixed curvature that can focus electromagnetic waves is being developed. The lens will have a ladder-shaped surface since it is made with unit cells.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Brazilian institutions CAPES, CNPq, and FAPEMIG for their financial support.

## REFERENCES

1. C. Caloz, C.-C. Chang, and T. Itoh, "Full-wave verification of the fundamental properties of left-handed materials in waveguide configurations," *J. Appl. Phys.*, vol. 90, no. 11, pp. 5483–5486, 2001.
2. Z. Jaksic, N. Dalarsson, and M. Maksimovic, "Negative refractive index metamaterials: Principles and applications," *Microw. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 36–49, 2006.
3. J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 18, p. 3966, 2000.
4. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, 2000.
5. G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, and P. C. Kremer, "Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 12, pp. 2702–2712, 2002.
6. B. I. Halim and A. Boutejdar, "Design and Simulation of Microstrip Antenna Using Composite Right/Left Handed Transmission Line (CRLH-TL) Technique for LTE and Radar Applications," in 2019 IEEE International Electromagnetics and Antenna Conference (IEMANTENNA), 2019, pp. 040–045.
7. A. Alizadeh, B. Rejaei, and M. Fardmanesh, "Tunable Stopband HTS Josephson Junction Left-Handed Transmission Line with Independently Biasable Unit Cells," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 1, pp. 1–8, 2020.
8. A. K. Iyer and G. V. Eleftheriades, "Free-space imaging beyond the diffraction limit using a Veselago-Pendry transmission-line metamaterial superlens," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 6, pp. 1720–1727, 2009.
9. A. K. Iyer and G. V. Eleftheriades, "Volumetric layered transmission-line metamaterial exhibiting a negative refractive index," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 23, no. 3, pp. 553–570, 2006.
10. S. M. Rudolph and A. Grbic, "Volumetric negative-refractive-index medium exhibiting broadband negative permeability," *J. Appl. Phys.*, vol. 102, no. 1, p. 13904, 2007.

11. S. Das, H.-L. Nguyen, G. N. Babu, and A. K. Iyer, "Free-Space Focusing at C-Band Using a Flat Fully Printed Multilayer Metamaterial Lens," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 11, pp. 4702–4714, 2015.
12. C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications. The Engineering Approach*. Wiley, 2006.
13. C. Caloz and T. Itoh, "Transmission line approach of left-handed (LH) materials and microstrip implementation of an artificial LH transmission line," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 5, pp. 1159–1166, 2004.
14. F. Elek and G. V. Eleftheriades, "A two-dimensional uniplanar transmission-line metamaterial with a negative index of refraction," *New J. Phys.*, vol. 7, 2005.
15. J. J. Oliveira and R. M. S. Batalha, "Application of Metamaterials Based on Transmission Line Parameters in Wireless Power Transfer," in *22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields - Compumag 2019*, 2019, vol. 1, no. 22nd, pp. 1–2.
16. C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2008.
17. C. R. Paul, *Inductance: Loop and Partial*. Hoboken: Wiley, 2010.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Acoplamento magnético ressonante forte 84

Automação de iluminação 150

### C

Cálculo de perdas de energia 39

Composto direito/esquerdo (CRLH) 117

Controle da iluminação 150

Correlação-cruzada 15

Custos anuais de construção de linhas de distribuição 39

### D

Detecção 94, 154

Durabilidade de rede de Bragg 25

### E

Eficiência energética 7, 150, 151, 153, 160

Encapsulamento 25, 27, 29, 30, 31, 32, 35

Energia eólica 161, 162, 168

Enlace analógico a fibra óptica 1, 13

Enlace fotônico sob baixa polarização 1

Estruturas periódicas 117

### F

FBG 5, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 35, 36, 37

Fotovoltaico 7, 94, 170, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180

Fuzzy Logic 5, 54, 55, 65, 68

### I

Índice de refração negativo 117

Inteligência artificial 55

### L

Lei de Kelvin 38, 39

LTE 7, 118, 125, 127, 128, 129, 136, 137

## **M**

Metamateriais 6, 84, 117

## **N**

Neuro-Fuzzy 127, 129, 130, 133, 134, 136, 137

## **O**

Otimização estática 39

## **P**

Perda de propagação 127, 128, 136

Permeabilidade negativa 117

Permissividade negativa 117

PID 6, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105

Planejamento de potência reativa 106

Proteção contra surtos 139, 140

## **R**

Rádio propagação sobre pontes 127

Rede de fibra de Bragg (FBG) 15

Refrigerador 139, 140, 141, 146, 147, 148

Reversão 94

Revisão literária 94

RFBG 5, 25, 26, 27, 28, 31, 32

RF em fotônica 1

Rotação 161, 162, 164, 166, 167, 168, 169

## **S**

Sensor à fibra óptica 15

Sistema DALI 150, 154, 155

Sistemas de alívio 15

Sistemas de distribuição 106, 115, 141

Sistemas de potência 106

Supercondutividade 84

Surtos elétricos 7, 139, 140, 141, 142, 144, 146, 148, 149

## **T**

Televisor 139, 140, 141, 144, 145

Transmissão de energia sem fio 6, 84

## V

Vazão 14, 15

Velocidade do vento 161, 163, 164, 165, 166, 167, 168






Vida útil 47, 139, 140, 141, 147, 148, 170



COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA ELÉTRICA 2

- 
-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
  -  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
  -  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
  -  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA ELÉTRICA 2

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)