



# As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3

---

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a  
Economia e o Meio Ambiente 3

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Natália Sandrini  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. 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.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

#### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-432-0 DOI 10.22533/at.ed.320192506  1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série.  CDD 658.5
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio	
Maria do Carmo de Andrade Nono	
José Vitor Cândido de Souza	
Sergio Luiz Mineiro	
Daniel Alessandro Nono	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925061</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos	
Daniel Araújo Farias de Melo	
Marinésio Pinheiro de Lima	
Tiago de Freitas Viana	
Igor Fernandes Gomes	
Leonardo José do Nascimento Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925062</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>26</b>
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira	
Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925063</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>42</b>
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo	
Aline Castilho Rodrigues	
Andres Cuña	
Nestor Tancredi	
Eduardo Mendez	
Heide Heloise Bernardi	
Mauricio Ribeiro Baldan	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925064</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>55</b>
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado	
Antônio Viana da Fonseca	
Eduardo Fortunato	
Daniela Raquel Ferreira Coelho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925065</b>	

<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>71</b>
CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA	
Ingrid Ariani Belineli Barbosa	
Heide Heloise Bernardi	
William Marcos Muniz Menezes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925066</b>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>80</b>
ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Luís Henrique Pires da Silva	
Alex Sander Chaves da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925067</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>92</b>
ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA	
Eduardo Pires Bonhin	
Sarah David Müzel	
Marcel Yuzo Kondo	
Lúcia de Almeida Ribeiro	
José Vitor Candido de Souza	
Marcos Valério Ribeiro	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925068</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>100</b>
CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117	
Leonardo de Souza Coutinho	
Alexandre Alvarenga Palmeira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925069</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>111</b>
MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS	
Filipi José Arantes Lemos	
João Mario Mendes de Freitas	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250610</b>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>127</b>
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	
Jamile Maria Araujo Tavares	
Rejane Martins Fernandes Canha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250611</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>142</b>
ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM	
Eduardo Dal Piva Schuch	
Magaiver Gabriel Lamp	
Conrado Mendes Morais	
Ângela Beatrice Dewes Moura	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250612</b>	

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>153</b>
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250613</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>156</b>
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250614</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>168</b>
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250615</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>183</b>
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250616</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>198</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNEO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250617</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>207</b>
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250618</b>	



<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>215</b>
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO	
Rosberguer de Almeida Camargo	
Mauren Costa da Silva	
Rafael Beltrame	
Darci Alberto Gatto	
Antônio Carlos da Silva Ramos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250619</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>223</b>
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL	
Giovanni Polette Dalla Libera	
Victor Moreira Leão	
Vitor Augusto de Sousa	
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza	
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira	
Marcelo Eduardo de Oliveira	
Adriano Rogério Bruno Tech	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250620</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>230</b>
CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	
Lenon Diniz Seixas	
Diego Solak Castanho	
Hugo Valadares Siqueira	
Fernanda Cristina Corrêa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250621</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>243</b>
CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC	
Luiz Otávio Limurci dos Santos	
Luiz Antonio Maccari Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250622</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>261</b>
PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6	
Marcos José de Moraes Filho	
Luciano Coutinho Gomes	
Darizon Alves de Andrade	
Josemar Alves dos Santos Junior	
Wanberton Gabriel de Souza	
Cássio Alves de Oliveira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250623</b>	

<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>275</b>
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS	
Pedro Henrique Aquino Barra Arnaldo José Pereira Rosentino Junior Antônio Carlos Delaiba	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250624</b>	
<b>CAPÍTULO 25</b> .....	<b>287</b>
PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA	
Vitor Hörbe Pereira Da Costa Antônio Flavio Licarião Nogueira Leonardo José Amador Salas Maldonado	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250625</b>	
<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>294</b>
SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS	
Guilherme Brasil Pintarelli Afrânio de Castro Antonio Jr. Raul Guedert Sandra Cossul Daniela Ota Hisayasu Suzuki	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250626</b>	
<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>307</b>
SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA	
Giovani Formaggio Mateus Ricardo Barroso Leite	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250627</b>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>322</b>
SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4	
Jobson De Araújo Nascimento José Moraes Gurgel Neto Alexsandro Aleixo Pereira da Silva Regina Maria de Lima Neta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250628</b>	
<b>CAPÍTULO 29</b> .....	<b>333</b>
ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO	
Rideci Farias Tiago Matias Lino Haroldo da Silva Paranhos Itamar de Souza Bezerra Ranieri Araújo Farias Dias Alexsandra Maiberg Hausser	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250629</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>346</b>

## PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA

### Vítor Hörbe Pereira Da Costa

Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento  
de Engenharia Elétrica  
Joinville – Santa Catarina

### Antônio Flavio Licarião Nogueira

Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento  
de Engenharia Elétrica  
Joinville – Santa Catarina

### Leonardo José Amador Salas Maldonado

Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento  
de Engenharia Elétrica  
Joinville – Santa Catarina

**RESUMO:** O artigo descreve uma montagem para aquisição do laço de histerese empregando resistores, capacitores e um osciloscópio digital. Os experimentos são efetuados em um pequeno transformador de potência tipo concha, projetado e construído para ensaios em laboratório. O uso de um osciloscópio digital com dois canais operando no modo  $XY$  permite o traçado do laço de histerese na tela do osciloscópio e a gravação em arquivo digital dos pontos que representam o lugar geométrico do laço no plano  $B-H$ . Dois algoritmos numéricos em linguagem Python são usados no pós-processamento das informações. O

primeiro algoritmo é voltado para o cálculo das perdas magnéticas a partir da área do ciclo de histerese. O segundo algoritmo produz a curva de magnetização normal através da junção dos pontos que representam os vértices situados no primeiro quadrante de um conjunto de laços de histerese concêntricos em torno da origem do plano  $B-H$ . Cada laço de histerese está associado a um nível diferente da tensão de alimentação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Histerese, Perdas magnéticas, Núcleo de transformadores

**ABSTRACT:** The paper describes a set-up for the acquisition of the hysteresis loop using lumped circuit elements and a digital oscilloscope. All experiments relate to an especially designed and constructed shell-type power transformer. By using the digital oscilloscope in the  $X-Y$  mode, the hysteresis loop can be exhibited on the oscilloscope, and data related to the loop can be recorded. Two numeric algorithms in Python language perform the post-processing calculations. The first algorithm evaluates the area of one hysteresis loop to compute the core loss. The second algorithm produces the mean magnetization curve by joining the points at the first-quadrant tips of a family of loops produced at different levels of excitation.

**KEYWORDS:** Hysteresis, Magnetic losses, Transformer cores

## 1 | INTRODUÇÃO

Os materiais ferromagnéticos são amplamente usados na indústria de equipamentos elétricos. Uma das aplicações mais relevantes desses materiais é a construção de transformadores. Surge assim a necessidade de caracterização do material ferromagnético. Ou seja, é preciso saber como um dado material irá se comportar quando submetido a um campo magnético de determinada intensidade (MALDONADO, 2015). É prática usual na indústria caracterizar materiais ferromagnéticos através dos laços de histerese magnética ou mesmo através da curva de magnetização normal. Os laços de histerese podem ser obtidos experimentalmente e os dados inerentes a cada laço podem ser processados separadamente empregando-se algoritmos numéricos para se estimar as perdas magnéticas no núcleo e levantar a curva de magnetização normal.

## 2 | O TRANSFORMADOR DE TESTE

O trabalho experimental é focado em um pequeno transformador do tipo concha com potência de 58 VA, projetado para operar na frequência de 60 Hz. Como se pode observar na Figura 1, os dois enrolamentos concêntricos, primário e secundário, estão localizados na trave central do núcleo laminado. O enrolamento externo forma o primário do transformador. Possui 240 espiras de cobre AWG-22 e tensão nominal de 48 V. O enrolamento interno, mais próximo à trave central, forma o secundário do transformador. Possui 1100 espiras de cobre AWG-28 e tensão nominal de 220 V. O núcleo do transformador é formado por laminações de aço com baixo teor de silício e espessura de 0,5 mm. Nenhum material isolante é inserido entre as lâminas adjacentes, e a condutividade elétrica das lâminas, medida em laboratório, é 2,71 MS/m. As dimensões geométricas do núcleo do transformador são indicadas na Figura 2.

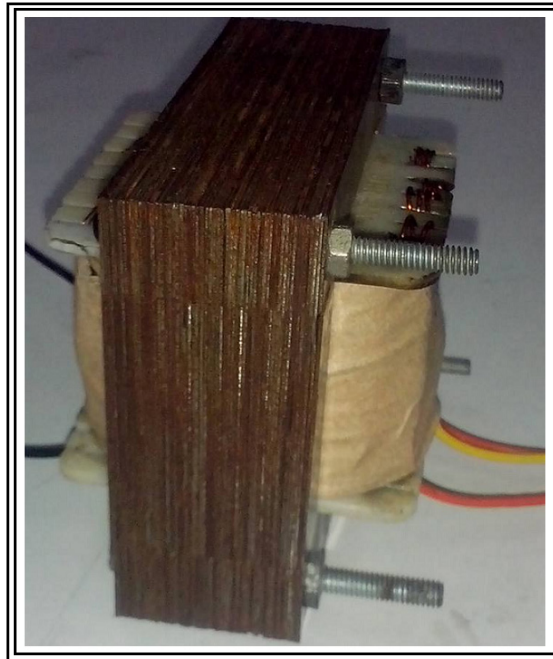


Figura 1. Fotografia do núcleo laminado do transformador de teste

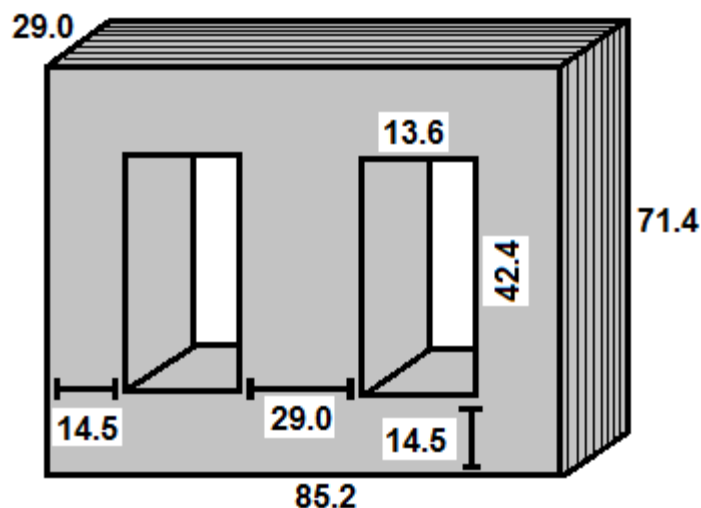


Figura 2. Núcleo do transformador. Dimensões geométricas em milímetro

### 3 | MONTAGEM DO EXPERIMENTO

A montagem do experimento para aquisição do laço de histerese deve ser feita de forma que o núcleo do transformador de teste possa, de fato, atingir a saturação magnética. A escolha mais óbvia para o experimento consiste em uma montagem similar ao ensaio de circuito aberto. Nessa condição de operação, a corrente secundária e a força magnetomotriz desmagnetizante são nulas, o fluxo magnético está totalmente confinado no núcleo e atinge valores elevados, limitados somente pela relutância finita do núcleo do transformador (NOGUEIRA, 2013).

O circuito eletroeletrônico empregado na montagem para aquisição do laço de histerese é mostrado na Figura 3. Nesse circuito, o ramo paralelo faz o papel de um “circuito integrador”, já que a tensão sobre o capacitor  $V_C$  é o resultado da integração analógica da corrente  $I_C$ . Esse ramo “desvia” parte da corrente que circula entre a fonte

e o enrolamento, e isso interfere negativamente no processo de aquisição dos sinais. Adicionalmente, o resistor  $R_1$  que é colocado em série com a fonte de alimentação também interfere negativamente no processo, porque aumenta a impedância vista pela fonte e reduz a magnitude da corrente que circula entre a fonte e o enrolamento primário.

Para minimizar os efeitos negativos desses componentes passivos no processo de aquisição dos sinais, o resistor  $R_2$  e o capacitor  $C$  que formam o ramo paralelo do circuito devem ser escolhidos de forma que a corrente desse ramo,  $I_C$ , seja muito menor que a corrente  $I_1$  que circula entre a fonte e o enrolamento. Em outras palavras, a magnitude da impedância do ramo paralelo deve ser muito maior que a magnitude da impedância intrínseca,  $Z_p$ , do enrolamento primário. Essa condição é expressa pela inequação  $|R_2 + 1/(j\omega C)| \gg |Z_p|$ , onde  $\omega$  representa a frequência angular em rad/s.

Na operação em circuito aberto, a corrente de primário é conhecida como corrente de excitação. Trata-se de uma corrente não senoidal, cuja amplitude para alimentação com tensão nominal é da ordem de 1 a 5% da corrente nominal do enrolamento. É desejável que a amostragem da corrente de excitação,  $I_1$ , não sofra redução significativa devido à presença do elemento  $R_1$  colocado em série com a fonte de alimentação. É prática usual o emprego de resistores-série  $R_1$  na faixa de 1,0 a 10,0 ohms, uma vez que possuem resistência elétrica suficientemente maior que a do enrolamento e por serem encontrados com facilidade nos laboratórios de eletrotécnica. Os valores dos componentes passivos empregados na montagem e escolhidos com base nesses critérios são indicados na Tabela I.

Componente	$R_1$ ( $\Omega$ W)	$R_2$ (k $\Omega$ )	$C$ ( $\mu$ F)
Valor	10,0	200	1,57

Tabela I - Valores dos componentes passivos empregados na montagem

No ensaio para aquisição do laço de histerese, o enrolamento primário de 240 espiras é alimentado através do autotransformador variável (*variac*). Para uma dada tensão de alimentação, circula uma corrente primária  $I_1$  que é obtida, de forma indireta, através da leitura do sinal de tensão  $V_{ch1}$  no canal X do osciloscópio. O valor do campo magnético  $H$  no núcleo do transformador é proporcional à corrente primária  $I_1$  e é calculado como função da tensão  $V_{ch1}$ . Já a indução magnética  $B$  no núcleo do transformador é proporcional à queda de tensão  $V_C$  sobre o capacitor, medida através da leitura do sinal de tensão  $V_{ch2}$  no canal Y do osciloscópio. Para se obter o laço de histerese e exibi-lo na tela do osciloscópio é necessário efetuar a composição dos sinais  $V_{ch1}$  e  $V_{ch2}$  no modo XY.

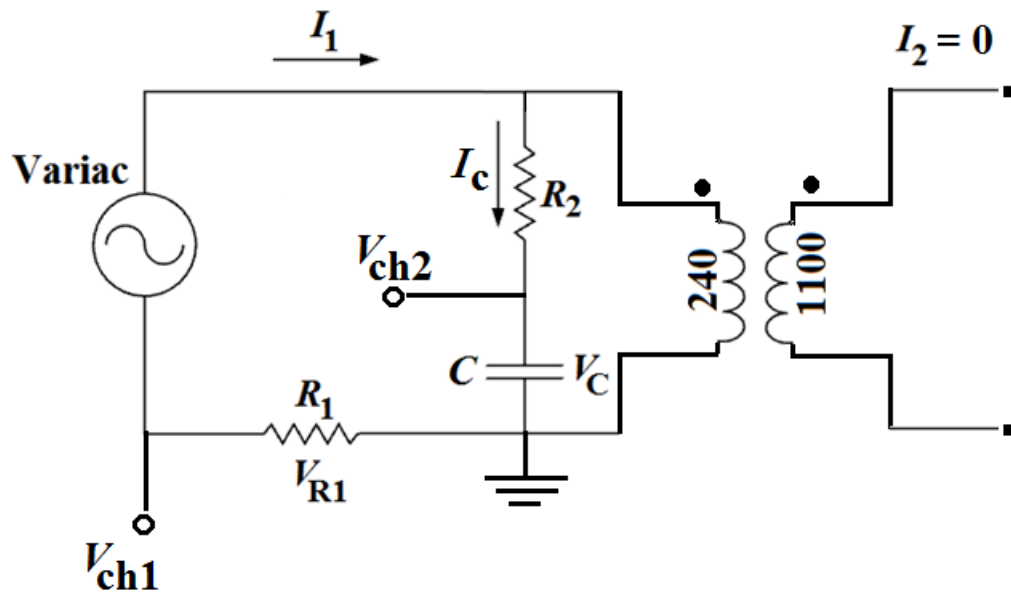


Figura 3. Circuito eletroeletrônico para aquisição do laço de histerese

As constantes de proporcionalidade entre as tensões medidas e as grandezas magnéticas  $H$  e  $B$  dependem dos valores dos elementos de circuito  $R_1$ ,  $R_2$  e  $C$ , bem como das dimensões geométricas do núcleo do transformador e número de espiras  $N_1$  e  $N_2$  dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente. Para um núcleo magnético com perímetro médio  $l_m$  e seção magnética  $A$ , a intensidade do campo magnético  $H$  no núcleo é calculada pela equação

$$H = \frac{N_1}{l_m \cdot R_1} \cdot V_{ch1}. \quad (1)$$

A indução magnética  $B$  no núcleo é calculada pela equação

$$B = \frac{R_2 \cdot C}{N_1 \cdot A} \cdot V_{ch2}. \quad (2)$$

Uma vez obtido o laço de histerese no osciloscópio, é possível gravar em um arquivo digital os pontos que definem o lugar geométrico do laço no plano  $B-H$  para processamento futuro.

#### 4 | PERDAS MÁGNÉTICAS E CURVA NORMAL

As informações relativas aos ciclos de histerese foram processadas externamente empregando-se algoritmos numéricos desenvolvidos em linguagem Python (PYTHON LANGUAGE REFERENCE, 2019). O primeiro algoritmo emprega os pontos  $(B,H)$  associados a um único ciclo de histerese, como aquele mostrado na Figura 4. Esse

algoritmo é usado no cálculo da potência média que quantifica as perdas magnéticas no núcleo do transformador na operação em circuito aberto. Nessa condição de operação, o enrolamento de 240 espiras é alimentado pela tensão nominal de 48 V. A densidade volumétrica de energia,  $w$ , associada a um ciclo de histerese é calculada pela integral cíclica

$$w = \oint H dB. \quad (3)$$

Para operação em uma dada frequência  $f$ , a potência média,  $P$ , que representa as perdas energéticas no núcleo do transformador é calculada pela integral cíclica

$$P = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot C \cdot f \cdot \oint V_{ch1} dV_c. \quad (4)$$

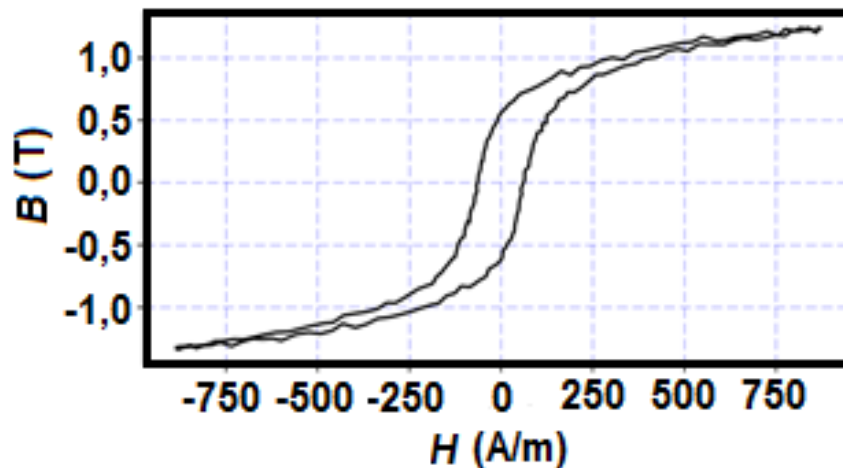


Figura 4. Laço de histerese

O método utilizado para traçar a curva de magnetização normal mostrada na Figura 5 é baseado na união dos vértices de um conjunto de laços de histerese concêntricos em torno da origem do plano  $B-H$  (Slemon and Straughen, 1982). A junção dos vértices é feita por um algoritmo numérico que utiliza segmentos retilíneos para unir os pontos  $(B,H)$  associados aos vértices situados no primeiro quadrante. Essa característica é a informação mais comumente encontrada em catálogos de fabricantes de materiais magnéticos e aços elétricos, e é utilizada com frequência em programas de análise numérica e projeto de máquinas e transformadores.



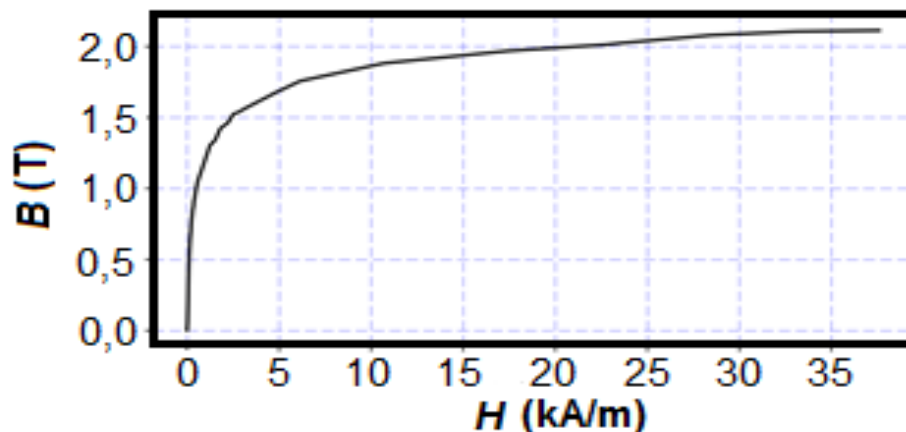


Figura 5. Curva de magnetização normal

## 5 | CONCLUSÕES

O artigo descreve um procedimento para aquisição e processamento numérico do laço de histerese magnética do núcleo de um transformador monofásico. Esse procedimento é uma alternativa de baixo custo para o processo de caracterização de materiais ferromagnéticos, já que na indústria a caracterização desses materiais é feita empregando-se equipamentos de custo elevado como o histeresígrafo e o quadro de Epstein.

## REFERÊNCIAS

MALDONADO, L.J.A.S. **Caracterização de materiais magnéticos a baixo custo aplicada à obtenção dos parâmetros de um dispositivo eletromagnético**. Dissertação de mestrado. Orientada por A.F.L. Nogueira. Universidade do Estado de Santa Catarina (2015).

NOGUEIRA, A.F.L. **Calculation of power transformers equivalent circuit parameters using numerical field solutions**. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, **17**(1) 19-26 (2013).

**PYTHON LANGUAGE REFERENCE**. Version 3.6.2. Python Software Foundation. Visited on 10/02/2019. Available: <http://www.python.org>

SLEMON, G.R. and STRAUGHEN, A. **Electric machines** (Addison Wesley Publishing Company, London, 1982), p. 16.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-432-0

