

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**Bernardo de Oliveira Jakitsch**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA EM  
ACOPLAMENTOS DO TIPO PINHÃO CREMALHEIRA**

**Belo Horizonte**

**2019**

Bernardo de Oliveira Jakitsch

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA EM  
ACOPLAMENTOS DO TIPO PINHÃO CREMALHEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Henrique Andrade Maia

Co orientador: Prof. Dr. Jánes Landre Jr.

Área de concentração: Análise estrutural e dinâmica

Belo Horizonte

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

J25a	<p>Jakitsch, Bernardo de Oliveira</p> <p>Avaliação da aplicação da técnica de emissão acústica em acoplamentos do tipo pinhão cremalheira / Bernardo de Oliveira Jakitsch. Belo Horizonte, 2019. 178 f.: il.</p> <p>Orientador: Luís Henrique Andrade Maia Coorientador: Jánes Landre Junior Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica</p> <p>1. Acústica. 2. Processamento de Sinais Assistido por Computador. 3. Engrenagens. 4. Desgaste mecânico. 5. Manutenção. 6. Análise estrutural (Engenharia). 7. Falhas estruturais. 8. Entropia. I. Maia, Luís Henrique Andrade. II. Landre Junior, Jánes. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.</p> <p>CDU: 625.2</p>
------	---

Ficha catalográfica elaborada por Rosemary Socorro Hosken - CRB 6/3170

**Bernardo de Oliveira Jakitsch**

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA EM  
ACOPLAMENTOS DO TIPO PINHÃO CREMALHEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

---

Prof. Dr. Luís Henrique Andrade Maia – PUC Minas (Orientador)

---

Prof. Dr. Jánes Landre Jr. – PUC Minas (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Ernani Sales Palma. – UFMG (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 26 de março de 2019

*“A invenção, devo modestamente admiti-lo, não consiste em criar disciplinadamente, mas sim em criar a partir do caos”*

Mary Shelley

## **Agradecimentos**

É de fundamental importância reconhecer que nenhum passo na vida eu daria se não houvesse minha família me dando suporte para acreditar em todos os meus sonhos, dessa forma, primeiramente os agradeço, e tomando as palavras do Dr. Henrique Dumont para si me disseram “estude estas matérias e não se esqueça de que o futuro do mundo está na mecânica. Você não precisa pensar em ganhar a vida; eu lhe deixarei o necessário para viver”

Acredito que nada disso seria possível sem que algumas pessoas acreditassem no meu potencial em momentos, agradeço então ao meu orientador, Professor Dr. Luís Maia e ao Professor Dr. Janés Landre Jr. por toda atenção ao orientar, dividir ideias ou por conselhos dados durante a realização deste trabalho além de toda confiança depositada na minha escolha para o projeto.

Tive o prazer de conviver com pessoas ímpares durante a elaboração deste trabalho, de modo que fica impossível descrever o quanto aprendi convivendo, debatendo e desabafando. A vocês Laura, André, Bruna, Marília e Maria Fernanda meu muito obrigado. Destaco ainda os companheiros da sala de estudos, mesmo que não citadas, parte do que apresento aqui remete a tudo que aprendemos juntos.

Seria de praxe agradecer aos técnicos da instituição, mas não acho que devo cita-los dessa forma, então, agradeço aos amigos Lucas, André Ribeiro, Ítalo, Tiago e Pedro por todos os bons momentos dentro e fora da PUC e, claro, por toda a ajuda nas partes técnicas deste trabalho.

Uma parcela deste trabalho remete a um esforço compartilhado com o aluno Luís Felipe, a quem eu agradeço por toda a disponibilidade e interesse entregues no desenvolvimento da proposta.

Claro que nada disso seria possível sem que a VALE acreditasse no projeto proposto. Acredito que a contribuição que ofereço no trabalho não se compara a contribuição que recebi. Serei eternamente grato pela oportunidade. Agradeço ainda a todos que de alguma forma contribuíram com o trabalho ou na caminhada para o ingresso no mestrado, estando, ou não, no presente momento.

## RESUMO

Parte integrante da indústria de extração de minério é o escoamento entre a mina e o ponto de despacho. Considerando a rotina produtiva no Brasil, o escoamento é feito majoritariamente por um modelo de conexão ferrovia-porto, com o minério armazenado em vagões duplos, com sua retirada feita por um equipamento conhecido como Virador de vagões. Tratando especificamente dos viradores, seu acionamento é feito por 2 pares de conjuntos pinhão-cremalheira funcionando em paralelo. O presente trabalho visa aplicar a técnica de monitoramento por emissão acústica em um modelo pinhão-cremalheira, análogo ao registrado no acionamento de um virador, gerando assim um maior entendimento sobre os fenômenos envolvidos bem como analisando os eventuais indicadores de falhas. Pretende-se empregar as técnicas de análise do sinal de maneira quantitativa, como RMS, Curtoses e Skewness, juntamente com um modelo de análise pela energia do sinal, como PSD e potência de banda e pôr fim a entropia espectral. A metodologia proposta resultou na percepção da maior sensibilidade da analisa pelo espectro do sinal com a entropia, gerando uma análise combinada entre a entropia espectral e a STFT do sinal

Palavras-chave: Emissão acústica. virador de vagões. Desgaste. Falha, Entropia espectral, STFT

## **ABSTRACT**

An integral part of the ore extraction industry is the flow between the mine and the point of dispatch. Considering the productive routine in Brazil, the flow is made mostly by a model of railroad-port connection, with the miner stored in double wagons, with its withdrawal made by an equipment known as Wagon Turner. By specifically dealing with the turners, its drive is made by 2 pairs of rack-and-pinion sets running in parallel. The present work aims to apply the acoustic emission monitoring technique in a rack-and-pinion model, analogous to that recorded in the drive of a tonnager, thus generating a better understanding of the involved phenomena as well as analyzing the eventual indicators of failure. It is intended to employ quantitative signal analysis techniques, such as RMS, Kurtoses and Skewness, along with a signal energy analysis model, such as PSD and bandwidth, and put an end to the Spectral Entropy. The proposed methodology resulted in the perception of the greater sensitivity of the analysis by the spectrum of the signal with the entropy, generating a combined analysis between the spectral entropy and the STFT of the signal

Keywords: Acoustic emission.rack-and-pinion, Fault, Spectral Entropy, STFT,RMS

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>1.1.Objetivo geral .....</b>	<b>31</b>
<b>1.2.Objetivos específicos.....</b>	<b>31</b>
<b>1.3.Justificativa.....</b>	<b>31</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>33</b>
<b>2.1.Engrenagens.....</b>	<b>33</b>
<i>2.1.1.Falhas por desgaste na linha de ação.....</i>	<i>35</i>
<i>2.1.2.Falhas por tensão na raiz do dente .....</i>	<i>38</i>
<b>2.2.Emissão Acústica.....</b>	<b>40</b>
<i>2.2.1.Emissão Acústica aplicada ao desgaste .....</i>	<i>41</i>
<i>2.2.2.Emissão Acústica aplicada ao diagnóstico de falhas .....</i>	<i>47</i>
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.Condições de teste .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.Processamento do sinal coletado .....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.Recursos .....</b>	<b>58</b>
<b>4. Resultados e discussões .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1.Análise da condição de controle .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.Análise das condições de desgaste induzido .....</b>	<b>72</b>
<i>4.2.1.Condição de desgaste induzido 01 .....</i>	<i>72</i>
<i>4.2.2.Condição de desgaste induzido 02 .....</i>	<i>80</i>
<i>4.2.3.Condição de desgaste induzido 03 .....</i>	<i>88</i>
<i>4.2.4.Condição de desgaste induzido 04 .....</i>	<i>92</i>
<b>4.3.Análise das condições de falha induzida.....</b>	<b>98</b>
<i>4.3.1.Condição de falha induzida em 01 mm .....</i>	<i>98</i>
<i>4.3.2.Condição de falha induzida em 02 mm .....</i>	<i>104</i>
<i>4.3.3.Condição de falha induzida em 03 mm .....</i>	<i>108</i>

<i>4.3.4. Condição de falha induzida em 04 mm</i> .....	113
<b>4.4. Condição de teste maiores velocidades</b> .....	<b>117</b>
<b>5. Conclusão</b> .....	<b>123</b>
<b>5.1. Sugestão para trabalhos futuros</b> .....	<b>124</b>
<b>Referências</b> .....	<b>125</b>
<b>Apêndice A – Complemento das análises da condição de controle</b> .....	<b>131</b>
<b>Apêndice B – Complemento das análises da condição de Defeito 01</b> .....	<b>136</b>
<b>Apêndice C – Complemento das análises da condição de Defeito 02</b> .....	<b>145</b>
<b>Apêndice D – Complemento das análises da condição de Defeito 03</b> .....	<b>155</b>
<b>Apêndice E – Complemento das análises da condição de Defeito 04</b> .....	<b>157</b>
<b>Apêndice F – Complemento das análises da condição de Falha 01</b> .....	<b>159</b>
<b>Apêndice G – Complemento das análises da condição de Falha 02</b> .....	<b>165</b>
<b>Apêndice H – Complemento das análises da condição de Falha 03</b> .....	<b>171</b>
<b>Apêndice I – Complemento das análises da condição de Falha 04</b> .....	<b>175</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Modelo esquemático de um virador de vagões.....	29
FIGURA 2 - Esquemático do acionamento de um VV .....	30
FIGURA 3 - Cenários possíveis de contato entre engrenagens .....	34
FIGURA 4 - Áreas de contato e pontos em um dente de engrenagem .....	34
FIGURA 5 - Tensão de Von Misses nos três pontos de contato.....	35
FIGURA 6 - Esquemático do contato entre engrenagens.....	36
FIGURA 7 - Evolução dos pittings de desgaste .....	37
FIGURA 8 - Distribuição esquemática de 3 condições de danos provocados .....	38
FIGURA 9 - Regiões de concentração de trincas em engrenagens .....	39
FIGURA 10 - Forma de propagação de trincas em engrenagens.....	39
FIGURA 11 – Esquemático de trinca induzida.....	40
FIGURA 12 - Mapa que relaciona espectro de frequência de EA por fenômeno.....	43
FIGURA 13 - Deformação das asperezas no ponto de contato.....	44
FIGURA 14 - Relação entre RMS teórico e prático com a carga aplicada.....	45
FIGURA 15 - Variação do RMS durante testes comparativos .....	46
FIGURA 16 – Valores de RMS por área desgastada a 220 N .....	46
FIGURA 17 - Crescimento de trinca a carga constante.....	48
FIGURA 18 - Gráfico tensão deformação .....	49
FIGURA 19 - Modelo de propagação de trinca.....	49
FIGURA 20 - Comparação modelo matemático de trincas .....	50
FIGURA 21 -Posicionamento dos sensores para localização de falhas .....	50
FIGURA 22 - Entropia espectral em diferentes janelas de tempo .....	52
FIGURA 23 - Entropia espectral em altas velocidades de contato .....	52
FIGURA 24 - Fluxograma do procedimento experimental .....	53
FIGURA 25 - Adaptação para fixação da cremalheira .....	54
FIGURA 26 – Adaptação para fixação do pinhão .....	55
FIGURA 27 - Representação dos módulos montados.....	55
FIGURA 28 - Superfícies de desgaste emulado .....	56
FIGURA 29 - Falhas emuladas na raiz do dente .....	57
FIGURA 30 - Organização dos dados calculados .....	58
FIGURA 31 - Condição da superfície nos testes de controle.....	61
FIGURA 32 – Dados em bruto e corrigidos quanto ao RMS.....	62

FIGURA 33 – Dados da condição de controle quanto a Kurtoses.....	62
FIGURA 34 – Dados da condição de controle quanto a Skewness .....	63
FIGURA 35 – Dados da condição de controle quanto a PSD .....	63
FIGURA 36 – Dados da condição de controle quanto a PSD .....	64
FIGURA 37 – Dados da condição de controle quanto a Entropia espectral.....	65
FIGURA 38 – Análise da Entropia Espectral do sinal de EA no 18° ciclo .....	66
FIGURA 39 - Análise da STFT do sinal de EA no 18° ciclo .....	66
FIGURA 40 - Análise do sinal de EA no 19° ciclo .....	67
FIGURA 41 - Análise do sinal de EA no 54° ciclo .....	68
FIGURA 42 - Análise do sinal de EA no 56° ciclo .....	69
FIGURA 43 - Análise do sinal de EA no 79° ciclo .....	70
FIGURA 44 - Análise do sinal de EA no 90° ciclo .....	71
FIGURA 45 – Análise do sinal de EA no 646° ciclo.....	72
FIGURA 46 - Condição da superfície nos testes de desgaste 01 .....	73
FIGURA 47 – Dispersão dos dados estatísticos do sinal de desgaste 01.....	74
FIGURA 48 – Dispersão da análises de potencia do sinal de desgaste 01 .....	75
FIGURA 49 – Dispersão da Entropia Espectral do sinal de desgaste 01 .....	76
FIGURA 50 – Análise do sinal no ponto 02.....	77
FIGURA 51 – Analise das Entropias Espectrais da condição de Desgaste 01 .....	78
FIGURA 52 – Analise das STFT da condição de Desgaste 01 .....	79
FIGURA 53 – Analise do sinal no ponto 243.....	80
FIGURA 54 – Analise do sinal no ponto 646.....	80
FIGURA 55 - Condição da superfície nos testes de desgaste 02 .....	81
FIGURA 56 – Dispersão dos dados estatísticos do sinal de desgaste 02.....	82
FIGURA 57 – Dispersão dos dados energia associada ao sinal de desgaste 02 .....	83
FIGURA 58 – Dispersão da entropia Espectral do sinal de desgaste 02 .....	84
FIGURA 59 - Análise do sinal de EA no 2° ciclo .....	85
FIGURA 60 - Análise do sinal de EA entre o 76° ao 177° ciclo.....	86
FIGURA 61 - Análise do sinal de EA entre o 404° ao 655° ciclo.....	87
FIGURA 62 - Condição da superfície nos testes de desgaste 03 .....	88
FIGURA 63 – Dispersão dos dados estatísticos do sinal de desgaste 03.....	89
FIGURA 64 – Dispersão dos dados energia associada ao sinal de desgaste 03 .....	90
FIGURA 65 – Dispersão da entropia Espectral do sinal de desgaste 03 .....	91
FIGURA 66 - Análise dos sinais de EA na condição de desgaste 03.....	92

FIGURA 67 - Condição da superfície nos testes de desgaste 04.....	93
FIGURA 68 – Dispersão dos dados estatísticos do sinal de desgaste 04 .....	94
FIGURA 69 – Dispersão dos dados energia associada ao sinal de desgaste 04.....	95
FIGURA 70 – Dispersão da entropia Espectral do sinal de desgaste 04.....	96
FIGURA 71 - Análise do sinal de EA no 78° ciclo.....	97
FIGURA 72 - Dispersão dos dados estatísticos do sinal de falha em 01 mm.....	99
FIGURA 73 - Dispersão da energia associada ao sinal de falha em 01 mm .....	101
FIGURA 74 - Dispersão da entropia Espectral do sinal de falha em 01 mm .....	102
FIGURA 75 – Sinais indicativos de falha na condição de trinca em 1 mm .....	103
FIGURA 76 - Dispersão dos dados estatísticos do sinal de falha em 02 mm.....	104
FIGURA 77 - Dispersão da energia associada ao sinal de falha em 02 mm .....	105
FIGURA 78 - Dispersão da entropia Espectral do sinal de falha em 02 mm .....	106
FIGURA 79 - Sinais indicativos de falha na condição de trinca em 2 mm .....	107
FIGURA 80 - Falso positivo reportado no 614° ciclo .....	108
FIGURA 81 - Dispersão dos dados estatísticos do sinal de falha em 03 mm.....	109
FIGURA 82 - Dispersão da energia associada ao sinal de falha em 03 mm .....	110
FIGURA 83 - Dispersão da entropia Espectral do sinal de falha em 03 mm .....	111
FIGURA 84 -Sinais indicativos de falha na condição de trinca em 3 mm .....	112
FIGURA 85 - Dispersão dos dados estatísticos do sinal de falha em 04 mm.....	113
FIGURA 86 - Dispersão da energia associada ao sinal de falha em 04 mm .....	114
FIGURA 87 - Dispersão da entropia Espectral do sinal de falha em 04 mm .....	115
FIGURA 88 - Sinais indicativos de falha na condição de trinca em 4 mm .....	116
FIGURA 89 - Falso positivo reportado no 188° ciclo .....	117
FIGURA 90 – Dispersão dos dados estatísticos em velocidade alterada.....	118
FIGURA 91 - Dispersão dos dados de energia do sinal em velocidade alterada ...	119
FIGURA 92 - Dispersão dos dados da EE do sinal em velocidade alterada.....	120
FIGURA 93 - Entropia Espectral no ponto de desgaste induzido .....	121
FIGURA 94 - Análise do sinal de EA no 21° ciclo.....	131
FIGURA 95 - Análise do sinal de EA no 54° ciclo.....	131
FIGURA 96 – Análise do sinal de EA no 112° ciclo .....	132
FIGURA 97 – Análise do sinal de EA no 423° ciclo .....	132
FIGURA 98 – Análise do sinal de EA no 647°ciclo .....	133
FIGURA 99 – Análise do sinal de EA no 648°ciclo .....	133
FIGURA 100 – Análise do sinal de EA no 649°ciclo .....	134

FIGURA 101 – Análise do sinal de EA no 650° ciclo.....	134
FIGURA 102 – Análise do sinal de EA no 651° ciclo.....	135
FIGURA 103 – Análise do sinal de EA no 654° ciclo.....	135
FIGURA 104 - Análise do sinal de EA no 659° ciclo .....	135
FIGURA 105 – Análise do sinal no ponto 28 – Defeito 01.....	136
FIGURA 106 – Análise do sinal no ponto 202 – Defeito 01.....	136
FIGURA 107 – Análise do sinal no ponto 270 – Defeito 01.....	137
FIGURA 108 – Análise do sinal no ponto 331 – Defeito 01.....	138
FIGURA 109 – Análise do sinal no ponto 362 – Defeito 01.....	138
FIGURA 110 – Análise do sinal no ponto 371 – Defeito 01.....	139
FIGURA 111 – Análise do sinal no ponto 380 – Defeito 01.....	139
FIGURA 112 – Análise do sinal no ponto 385 – Defeito 01.....	140
FIGURA 113 – Análise do sinal no ponto 387 – Defeito 01.....	140
FIGURA 114 – Análise do sinal no ponto 391 – Defeito 01.....	141
FIGURA 115 – Análise do sinal no ponto 400 – Defeito 01.....	141
FIGURA 116 – Análise do sinal no ponto 453 – Defeito 01.....	142
FIGURA 117 – Análise do sinal no ponto 514 – Defeito 01.....	142
FIGURA 118 – Análise do sinal no ponto 542 – Defeito 01.....	143
FIGURA 119 – Análise do sinal no ponto 644 – Defeito 01.....	143
FIGURA 120 - Análise do sinal de EA no 2° ciclo – Defeito 02 .....	145
FIGURA 121 - Análise do sinal de EA no 8° ciclo – Defeito 02 .....	145
FIGURA 122 - Análise do sinal de EA no 19° ciclo – Defeito 02 .....	146
FIGURA 123 - Análise do sinal de EA no 76° ciclo – Defeito 02 .....	146
FIGURA 124 - Análise do sinal de EA no 80° ciclo – Defeito 02 .....	147
FIGURA 125 - Análise do sinal de EA no 91° ciclo – Defeito 02 .....	147
FIGURA 126 - Análise do sinal de EA no 101° ciclo – Defeito 02 .....	148
FIGURA 127 - Análise do sinal de EA no 107° ciclo – Defeito 02 .....	148
FIGURA 128 - Análise do sinal de EA no 124° ciclo – Defeito 02 .....	148
FIGURA 129 - Análise do sinal de EA no 135° ciclo – Defeito 02 .....	149
FIGURA 130 - Análise do sinal de EA no 142° ciclo – Defeito 02 .....	149
FIGURA 131 - Análise do sinal de EA no 157° ciclo – Defeito 02 .....	150
FIGURA 132 - Análise do sinal de EA no 165° ciclo – Defeito 02 .....	150
FIGURA 133 - Análise do sinal de EA no 177° ciclo – Defeito 02 .....	151
FIGURA 134 -Análise do sinal de EA no 341° ciclo – Defeito 02 .....	151

FIGURA 135 -Análise do sinal de EA no 497° ciclo – Defeito 02.....	152
FIGURA 136 -Análise do sinal de EA no 514° ciclo – Defeito 02.....	152
FIGURA 137 -Análise do sinal de EA no 542° ciclo – Defeito 02.....	153
FIGURA 138 -Análise do sinal de EA no 586° ciclo – Defeito 02.....	153
FIGURA 139 -Análise do sinal de EA no 644° ciclo – Defeito 02.....	154
FIGURA 140 -Análise do sinal de EA no 646° ciclo – Defeito 02.....	154
FIGURA 141 - Análise do sinal de EA no 492° ciclo – Defeito 03.....	155
FIGURA 142 - Análise do sinal de EA no 493° ciclo – Defeito 03.....	156
FIGURA 143 - Análise do sinal de EA no 647° ciclo – Defeito 03.....	156
FIGURA 144 - Análise do sinal de EA no 208° ciclo – Defeito 04.....	157
FIGURA 145 - Análise do sinal de EA no 361° ciclo – Defeito 04.....	157
FIGURA 146 - Análise do sinal de EA no 471° ciclo – Defeito 04.....	157
FIGURA 147 - Análise do sinal de EA no 484° ciclo – Defeito 04.....	158
FIGURA 148 - Análise do sinal de EA no 27° ciclo – Falha 01 .....	159
FIGURA 149 - Análise do sinal de EA no 56° ciclo – Falha 01 .....	159
FIGURA 150 - Análise do sinal de EA no 79° ciclo – Falha 01 .....	160
FIGURA 151 - Análise do sinal de EA no 87° ciclo – Falha 01 .....	160
FIGURA 152 - Análise do sinal de EA no 154° ciclo – Falha 01 .....	160
FIGURA 153 - Análise do sinal de EA no 163° ciclo – Falha 01 .....	161
FIGURA 154 - Análise do sinal de EA no 170° ciclo – Falha 01 .....	161
FIGURA 155 - Análise do sinal de EA no 275° ciclo – Falha 01 .....	162
FIGURA 156 - Análise do sinal de EA no 421° ciclo – Falha 01 .....	162
FIGURA 157 - Análise do sinal de EA no 519° ciclo – Falha 01 .....	163
FIGURA 158 - Análise do sinal de EA no 674° ciclo – Falha 01 .....	163
FIGURA 159 - Análise do sinal de EA no 192° ciclo – Falha 02.....	165
FIGURA 160 - Análise do sinal de EA no 334° ciclo – Falha 02.....	165
FIGURA 161 - Análise do sinal de EA no 540° ciclo – Falha 02.....	166
FIGURA 162 - Análise do sinal de EA no 590° ciclo – Falha 02.....	166
FIGURA 163 - Análise do sinal de EA no 607° ciclo – Falha 02.....	166
FIGURA 164 - Análise do sinal de EA no 614° ciclo – Falha 02.....	167
FIGURA 165 - Análise do sinal de EA no 647° ciclo – Falha 02.....	167
FIGURA 166 - Análise do sinal de EA no 672° ciclo – Falha 02.....	168
FIGURA 167 - Análise do sinal de EA no 684° ciclo – Falha 02.....	168
FIGURA 168 - Análise do sinal de EA no 707° ciclo – Falha 02.....	169

FIGURA 169 - Análise do sinal de EA no 2° ciclo – Falha 03 .....	171
FIGURA 170 - Análise do sinal de EA no 8° ciclo – Falha 03 .....	171
FIGURA 171 - Análise do sinal de EA no 45° ciclo – Falha 03 .....	172
FIGURA 172 - Análise do sinal de EA no 213° ciclo – Falha 03 .....	172
FIGURA 173 - Análise do sinal de EA no 501° ciclo – Falha 03 .....	172
FIGURA 174 - Análise do sinal de EA no 66° ciclo – Falha 04 .....	175
FIGURA 175 - Análise do sinal de EA no 121° ciclo – Falha 04 .....	175
FIGURA 176 - Análise do sinal de EA no 123° ciclo – Falha 04 .....	176
FIGURA 177 - Análise do sinal de EA no 129° ciclo – Falha 04 .....	176
FIGURA 178 - Análise do sinal de EA no 179° ciclo – Falha 04 .....	177
FIGURA 179 - Análise do sinal de EA no 188° ciclo – Falha 04 .....	177
FIGURA 180 - Análise do sinal de EA no 283° ciclo – Falha 04 .....	177
FIGURA 181 - Análise do sinal de EA no 389° ciclo – Falha 04 .....	178
FIGURA 182 - Análise do sinal de EA no 396° ciclo – Falha 04 .....	178
FIGURA 183 - Análise do sinal de EA no 397° ciclo – Falha 04 .....	181
FIGURA 184 - Análise do sinal de EA no 495° ciclo – Falha 04 .....	181

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Pontos de análise no teste de Controle.....	65
TABELA 2 - Pontos de análise no teste de desgaste 01 .....	76
TABELA 3 - Pontos de análise no teste de desgaste 02 .....	84
TABELA 4 - Pontos de análise no teste de desgaste 03.....	91
TABELA 5 - Pontos de análise no teste de desgaste 04.....	96
TABELA 6 - Pontos de análise no teste de falha em 01 mm.....	102
TABELA 7 - Pontos de análise no teste de falha em 02 mm.....	106
TABELA 8 - Pontos de análise no teste de falha em 03 mm.....	111
TABELA 9 - Pontos de análise no teste de falha em 04 mm.....	115
TABELA 10 – Pontos para análise na condição de velocidade alterada.....	120

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EA	Emissão Acústica
EE	Entropia Espectral
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
KTS	<i>Kurtoses</i>
NL	Não Linearidade
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SKW	<i>Skewness</i>
STFT	<i>Short time Fourier Transform</i>
VIS	Visibilidade de trincas

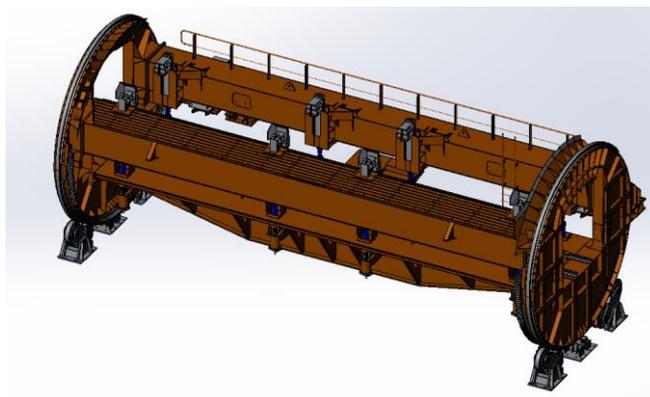
## 1. INTRODUÇÃO

Compreendendo parte fundamental do desenvolvimento da humanidade, os minerais e seus produtos pautaram a evolução da sociedade, conduzindo o curso da história e nomeando períodos em alguns casos. Considerando suas proporções continentais, o Brasil possui papel crucial no fornecimento de diversos recursos naturais, sendo toda nossa economia majoritariamente sustentada por este tipo exploração. Tratando especificamente do minério de ferro, fez-se necessária a intervenção estatal na criação de empresas pra a exploração deste recurso, entretanto, diante das mudanças geopolíticas e tecnológicas durante os anos 90, optou-se por abrir o mercado brasileiro a corporações internacionais e diminuir a participação do estado nas empresas nacionais, possibilitando assim uma economia de mercado que coloca o Brasil entre um dos países mais competitivos quanto a comercialização deste recurso

Considerando o ciclo extrativo do minério no Brasil, as variáveis logísticas demandam uma estrutura de escoamento fracionado entre o bombeamento da polpa por dutos ou o transporte por via ferroviária. Tratando somente a última, o ciclo iniciado na mina finda majoritariamente em portos, em que a transição entre a ferrovia e a linha é feita por uma estrutura que efetua o giro de um conjunto de vagões afim de escoar o minério para movimentação no porto.

Um virador de vagões (VV's), apresentado na Figura 1, pode ser descrito como um conjunto mecânico de rolagem no eixo longitudinal do equipamento de forma que o minério no interior do vagão escoar sobre uma das laterais.

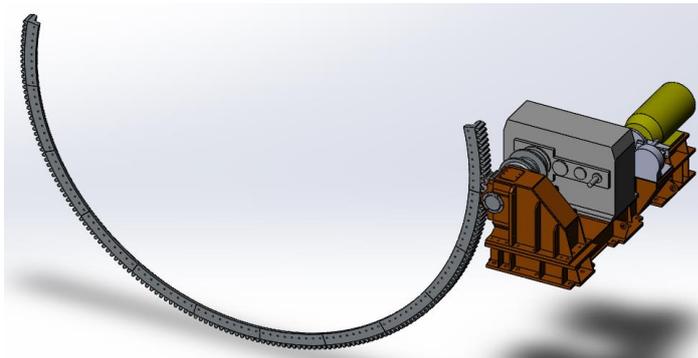
**Figura 1 - Modelo esquemático de um virador de vagões**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Considerado como um equipamento robusto, os VV's, são submetidos a cargas cíclicas e variáveis durante sua operação, seja pelo volume grande de minério transportado, próximo a 130 toneladas em alguns casos, seja pela variação de umidade e granulometria, que mudam as características de escoamento. Estas variações constantes tendem a levar o ativo a trabalhar fora das especificações de projeto que, embora tenha coeficientes de segurança, não foi projetado considerando as variações dinâmicas. O movimento de rolagem sobre o eixo é transmitido através de uma relação de acoplamento do tipo pinhão cremalheira, conforme exibido na Figura 2, toda transmissão de força dos motores para o conjunto é feita através de um par pinhão cremalheira presente em cada uma das extremidades do conjunto que, trabalhando em paralelo e simultaneamente, garantem o correto funcionamento do ativo.

**Figura 2 - Esquemático do acionamento de um VV**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Possuindo uma demanda constante, devido a também crescente demanda do mercado, os Viradores apresentam uma rotina de manutenção centrada na substituição e, considerando somente os dados já tratados em 2016, e registra-se 2 trocas do pinhão do lado sul do virador, com intervalo inferior a 100 dias entre as substituições. Já a cremalheira, operou durante 87 dias entre as intervenções de troca. Tratando do lado Norte, a vida do pinhão foi de 132 dias, a cremalheira foi substituída com máximo de 55 dias e mínimo de 32.

Tratando especificamente das atividades de manutenção dos viradores, a inspeção da integridade atualmente é realizada com a subjetividade do critério de um inspetor que, por mais treinado que possa ser, ainda falha na detecção d e

problemas estruturais em estágios iniciais, representando desta forma perdas na casa de bilhões em despesas de parada para manutenção

Considerando a criticidade do equipamento e somando-se a demanda por produtividade e a dificuldade de se estabelecer critérios objetivos de manutenção, o presente trabalho objetiva-se em estudar um modelo análogo ao mecanismo pinhão cremalheira responsável pela movimentação de um virador de vagões. O modelo proposto foi monitorado com auxílio da coleta dos sinais de Emissão acústica inerentes a operação, técnica de medição indireta capaz de gerar indicadores de operação, como desgaste e falha, além de possibilitar estudos abrangentes quanto ao momento correto de substituição ou reparo de um conjunto.

### **1.1. Objetivo geral**

Aplicar a técnica da emissão acústica para diagnosticar as falhas típicas em um conjunto pinhão cremalheira modular.

### **1.2. Objetivos específicos**

- a) Desenvolver metodologia de coleta e tratamento de sinais da emissão acústica (EA) em um conjunto pinhão cremalheira;
- b) Avaliar as alterações do sinal de EA em um conjunto pinhão cremalheira em condições distintas de falhas e desgastes induzidos;
- c) Aplicar método de tratamento de sinais para gerar indicadores capazes de diagnosticar falhas e desgaste;
- d) Discutir a sensibilidade das técnicas de processamento de sinais em relação as condições induzidas nos testes;

### **1.3. Justificativa**

Considerando as técnicas tradicionais de manutenção, aponta-se como uma constante a dependência da experiência dos responsáveis técnicos quanto a capacidade de diagnóstico. Dada a crescente demanda por assertividade, demanda-se a aplicação de técnicas que possam reportar não só o estado de preservação da parte estudada mas também gerar indicadores e propiciar uma manutenção

assertiva e elevar a disponibilidade do conjunto. Dado o contexto, as técnicas de medição indireta respondem as demandas e reduzem a subjetividade inerente a experiência do responsável técnico. Considera-se como alternativa a adoção da técnica da Emissão Acústica (EA) como mecanismo de diagnóstico, uma vez que esta atende quanto a capacidade de diagnóstico de falha e dos mecanismos responsável e não sobre interferências severas das condições dinâmicas como as demais técnicas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

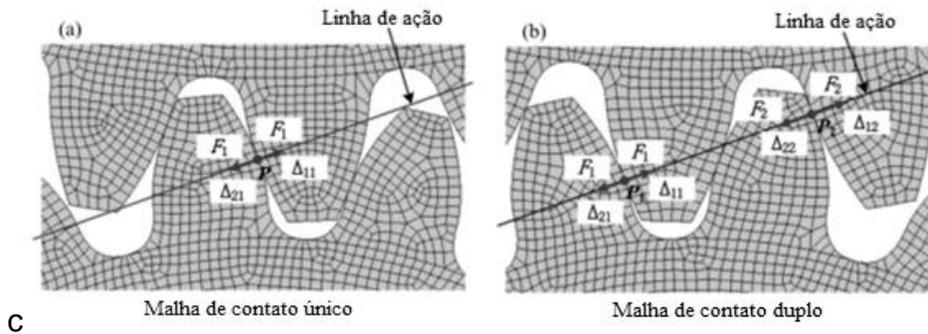
O presente capítulo tem por finalidade expor o referencial teórico e o estado da arte relevante para o entendimento do conjunto analisado. Primeiramente expõem-se o funcionamento de um par engrenado, as principais causas de falha e a forma de se emular as falhas em estudos dinâmicos. Posteriormente discute-se a aplicabilidade da técnica de emissão acústica em conjuntos engrenados, como o sinal se comporta no monitoramento do desgaste e na percepção de trincas no conjunto. Por fim, discute-se as técnicas de processamento do sinal de EA e na resposta quantitativa ou qualitativa resultante das aplicações das técnicas de RMS, Curtoses, Skewness, PSD, Energia do sinal e Entropia Espectral.

### 2.1. Engrenagens

Dada a teoria clássica da mecânica, Juvinal (2012) propõe que as engrenagens podem ser definidas como qualquer corpo dentado que transmite rotação entre eixos em contato. Ainda segundo o autor, este princípio está presente no desenvolvimento histórico da humanidade o que, somado a sua eficiência de 98% na transmissão de movimento, explica sua vasta aplicação.

Conforme descrito por Budynas et al (2009), o contato entre duas estruturas dentadas acontece no seu círculo primitivo, de forma a permitir uma rolagem entre as superfícies. Tal característica permite traçar uma linha ortogonal ao diâmetro primitivo, criando o conceito de linha de pressão ou linha de ação. Entretanto, a teoria apresentada por Juvinal (2012) e Budynas et al (2009) não leva em conta o comportamento dinâmico do acoplamento entre dentes. Dessa forma, Liang et al.(2018) expõem que o contato entre engrenagens está relacionado não somente a geometria e construção mas também as características das cargas envolvidas no conjunto. Os autores então consideram a possibilidade de duas linhas de ação no contato entre pares engrenados, conforme demonstrado na Figura 3, em que destacam-se o pontos de contato único, Figura 3(a), e de contato em duplo, Figura 3(b)

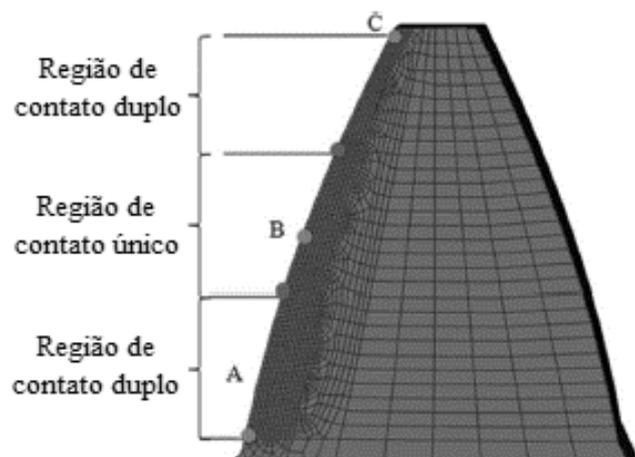
**Figura 3 - Cenários possíveis de contato entre engrenagens**



**Fonte:** Liang; Zhang; et al. (2018)

Considerando um dente de maneira isolada, Qin et al.(2014) exemplificam o perfil isolado de um dente considerando a teoria apresentado por Liang et al.(2018), A Figura 4, proposta por Qin et al.(2014), divide um dente em 3 regiões, de forma que em A e C observa-se as áreas de contato duplo e em B a região de contato singular

**Figura 4 - Áreas de contato e pontos em um dente de engrenagem**

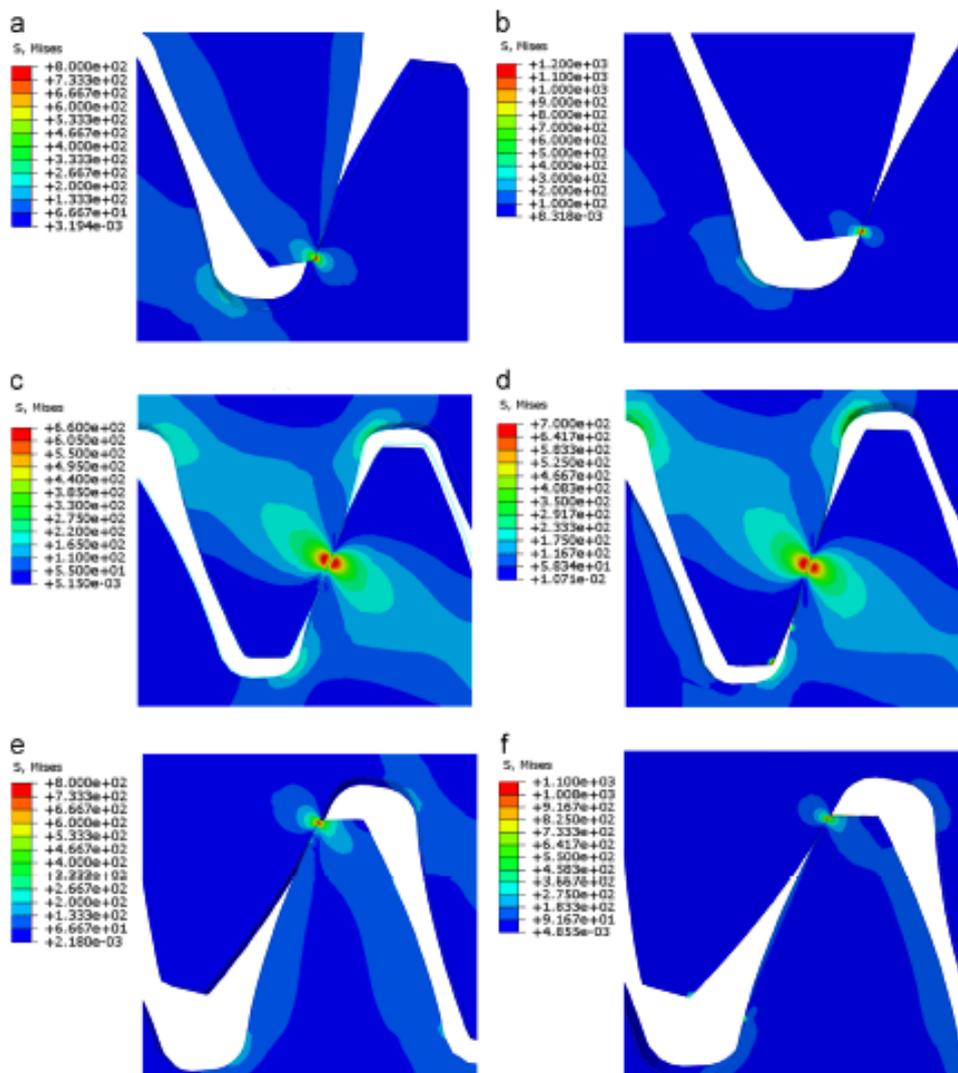


**Fonte:** Qin et al.(2014)

Em adição, Qin et al.(2014) ainda apresenta as interações nas zonas de contato quando um conjunto de engrenagens comparando o resultados das tensões em duas faixas de rotações, 600 e 1200 rpm. A Erro! Fonte de referência não encontrada. apresenta os casos analisados a e b apontam a interação no ponto em que o contato entre os pares ocorre em 2 pontos. Expressa-se em c e d a região de contato único e por fim as partes e além da f tem como foco de a condição de

contato em 2 pontos. As rotações de a, c e e são de 600 rpm, enquanto b, d e f são 1200 rpm.

**Figura 5 - Tensão de Von Mises nos três pontos de contato**



Fonte: Qin et al.(2014)

A análise de Qin et al.(2014) apresenta a hipótese de que a tensão de contato induza as falhas em um par engrenado. Considera-se assim 3 tipos de falhas resultantes do contato, a primeira seria o desgaste na linha de ação, a segunda seria as trincas na raiz do dente, e por fim, a mudança na geometria do dente podendo acarretar ou não na remoção do mesmo.

### **2.1.1. Falhas por desgaste na linha de ação**

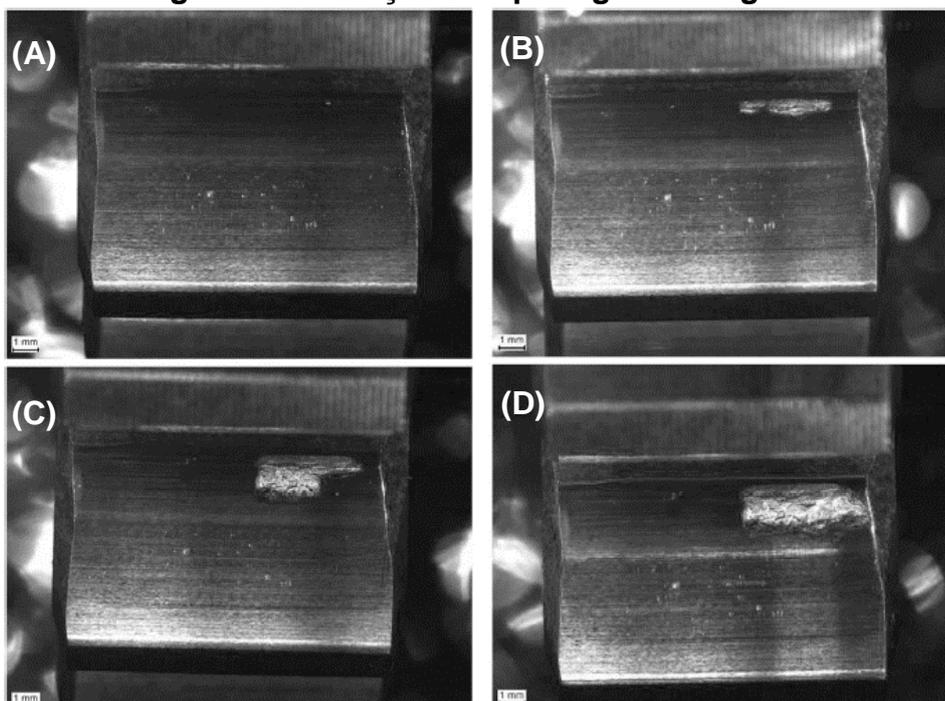
Considerando o desgaste resultante do contato entre um pares engrenados, Sharma et al. (2017a) apresentam a hipótese que o desgaste no contato entre as linhas de ação seja resultado da interação entre os perfis de rugosidade das superfícies. Em adição, Morales-espejel et al. (2018) propõem que a resultante das forças de tração de contato na linha de ação do par engrenado seja a responsável pelo desgaste, tal condição e descrita na Figura 6, em que os autores exploram as curvas de tensão resultantes do contato.

**Figura 6 - Esquemático do contato entre engrenagens**



**Fonte: Morales-espejel et al. (2018)**

Considerando as falhas na linha de ação, Kattelus et al. (2016) discorre sobre como as deformações superficiais macroscópicas, também denominados como pitting, surgem das interações de contato de Hertz. A Figura 7 apresenta a inspeção visual de uma engrenagem selecionada pelos autores, em Figura 7(a) exibe o estado do dente após 2,5 milhões de ciclos de carga, na qual os autores observam somente pittings de contato, já na Figura 7(b), após 10 milhões de ciclos, observa-se ainda os pittings mas evidenciou-se uma região específica em que removeu-se parte da superfície de contato. Nas divisões (c) e (d), os ciclos de carregamento evoluíram em uma fração mínima de ciclos, entretanto, o desgaste evoluiu rapidamente entre os casos exibidos entre a Figura 7(c) e (d).

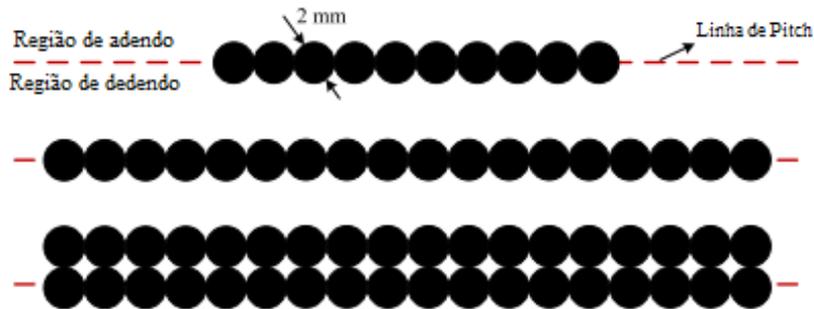
**Figura 7 - Evolução dos pittings de desgaste**

Fonte: Kattelus et al. (2016)

Em consonância com o apresentado por Kattelus et al. (2016), Luo et al. (2019) concluem que os pittings e espelhamentos nas superfícies são resultado de inúmeros, ciclos de tensão no contato no par engrenado, o que resulta em deformações em escalas distintas, sendo o micro-pitting mensurado em aproximadamente 0,01mm e o macro-pitting atingindo medidas próximas a 0,8mm.

Em se tratando de estudos que simulam a evolução do desgaste, Liang et al. (2016) expõem um modelo de simulação de desgaste através da indução de furos nas zonas de contato com 2 mm de diâmetro e profundidade de 1 mm, alterando a razão de contato. A distribuição dos furos é mostrada na Figura 8, destaca-se que a mudança na área de contato resultante foi de respectivamente 16,2; 29,2 e 58,4%

**Figura 8 - Distribuição esquemática de 3 condições de danos provocados**



Fonte: Liang et al.(2016)

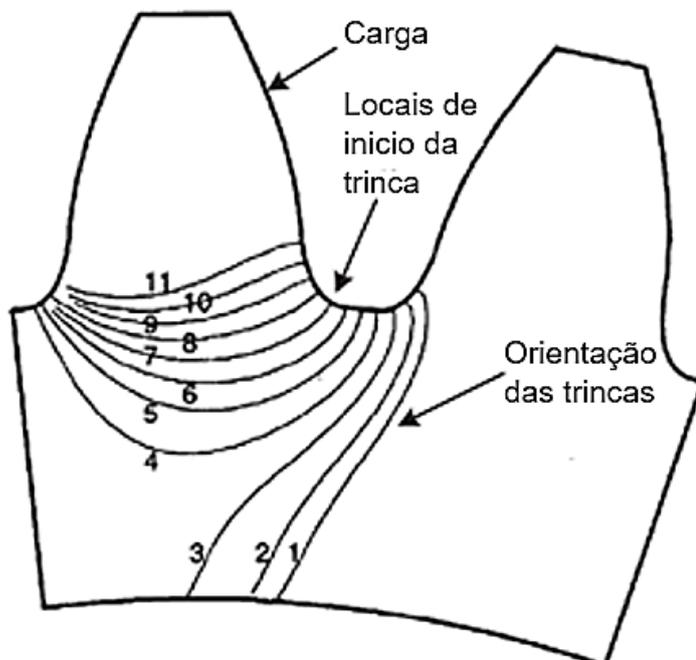
Seguindo a proposta de falhas induzidas, Sánchez et al (2018) a aplicabilidade de falhas induzidas na análise do sinal de EA. Quanto a avaliação da técnica em modelagens matemáticas cita-se Liang et al. (2016) quando estes comparam os resultados numéricos induzidos com condições praticas observadas, concluindo na verossimilhança entre as partes

### **2.1.2. Falhas por tensão na raiz do dente**

Considerando a proposição de que a tensão na raiz do resultante do contato entre pares engrenados por Qin et al.(2014), Curà et al. (2017) apresentam modelo computacional que discute a origem das trincas no perfil de um dente. Os autores concluíram que as trincas primeiramente surgem na região central de um dente e posteriormente se propagam em sentido uniaxial até atingirem as extremidades.

Em adição ao apresentado por Qin et al.(2014) e Curà et al. (2017),Liang et al. (2018) apresenta a concepção que sentindo de evolução de uma trinca dependa de dos fatores geométricos distintos, sendo o primeiro relacionado a geometria de montagem e operação e o segundo o perfil construtivo do dente. Os autores ainda expõem as possibilidades de propagação das trincas no perfil, destacando 11 casos de evolutivos em um dente padrão com carga aplicada conforme apontado na Figura

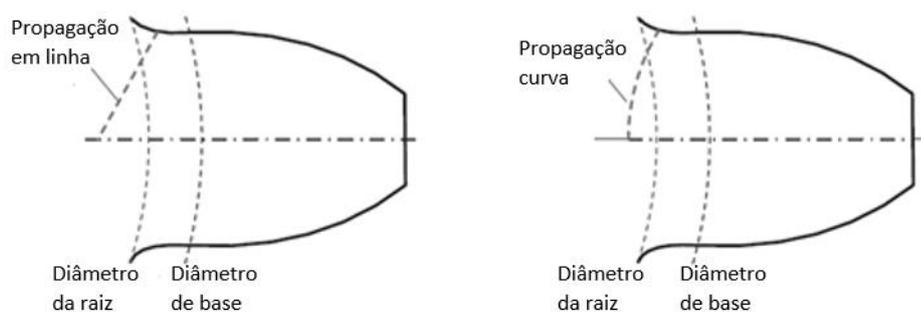
**Figura 9 - Regiões de concentração de trincas em engrenagens**



Fonte: Liang et al. (2018)

Uma das constatações de Liang et al. (2018) é que as trincas se propagam geralmente de maneira suave, contínua e em quase a totalidade dos casos em linha reta, condição mostrada na Figura 10. Tal constatação também é evidenciada por Chen; Shao (2011), em que os autores adotam este princípio na simulação da evolução e trincas.

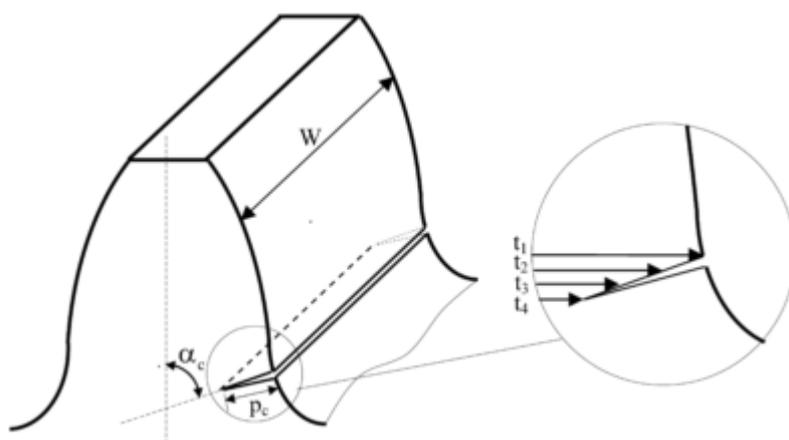
**Figura 10 - Forma de propagação de trincas em engrenagens**



Fonte: Liang et al. (2018)

Explorando necessariamente rigidez de engrenagens, Chaari et al (2009) apresentam um modelo de abertura de trincas em uma engrenagem. Figura 11 apresenta o esquemático da trinca proposta nos estudos realizados.

**Figura 11 – Esquemático de trinca induzida**



Fonte: Chaari et al (2009)

## 2.2. Emissão Acústica

Considera-se como um dos conceitos fundamentais a emissão acústica a interpretações das características do meio envolvido. Segundo Baranov et al. (2007), a natureza discreta inerente aos materiais faz com que, ao ser efetuada uma solicitação de qualquer tipo, a resposta como fenômenos físicos também seja discreta. A ideia da continuidade está na resultante de eventos semelhantes ocorrendo sequencialmente quando as solicitações se prolongam no tempo. Fica evidente, ainda segundo o autor, que a continuidade implica na provável incidência de fenômenos tangíveis, o que altera a estrutura e o estado de energia do material envolvido.

Apresenta-se assim o fenômeno da Emissão Acústica (EA) como a propagação em ondas elásticas mecânicas geradas da mudança, macroscópica ou não, no rearranjo do material. O sinal pode se manifestar de duas maneiras conforme descrito por Baranov et al. (2007), sendo a primeira de EA contínua, em que o número de eventos geradores de ondas elásticas é relativamente bom e a energia isolada é pequena, e a EA discreta, na qual um grande número de eventos acontece em uma janela pequena de tempo.

Quanto a natureza do sinal, observa-se que os sinais de emissão acústica gerados após a aplicação de um carregamento são irreversíveis, essa característica, que é conhecida como efeito Kaiser, permite concluir que para que haja novos sinais de emissão acústica a carga aplicada deve superar o estado prévio de carregamento. (Maia et al. ,2015)

De acordo com Sharma et al. (2017a), as faixas de frequência comumente excitada durante os fenômenos varia de 100 kHz a 1MHz, tomando ainda como princípio fundamental a propagação multidirecional, dessa forma o sensor pode ser fixado em qualquer direção para a coleta dos sinais. Tan et al. (2007) expõem esta como uma das vantagens da técnica, quando comparada a técnica de coleta vibracional, que necessita das informações sobre os eixos. Além disso, o autor cita como vantagens:

- a) A emissão acústica é produzida na interação de vínculos microscópicos, e por se tratar de uma técnica extremamente sensível, cria-se a possibilidade de identificar defeitos nos seus primeiros estágios, o que não é possível com outras técnicas;
- b) Por detectar somente ondas de alta frequência, a EA tende a não sofrer interferências dos efeitos de ressonância e de outros mecanismos que geram ruído.

Em adição, McLaskey et al. (2010) propõem que a principal diferença entre EA e outros métodos é que este não depende de mudanças sutis nas características de propagação de onda do material para detectar rachaduras e falhas. Em vez disso, os sinais gravados são uma função direta da energia liberada de mecanismos de danos locais. Os sinais coletados por um sensor de emissão acústica dependem da natureza do mecanismo e do material através do qual as ondas se propagam, das características do sensor e do sistema de aquisição de dados.

### **2.2.1. Emissão Acústica aplicada ao desgaste**

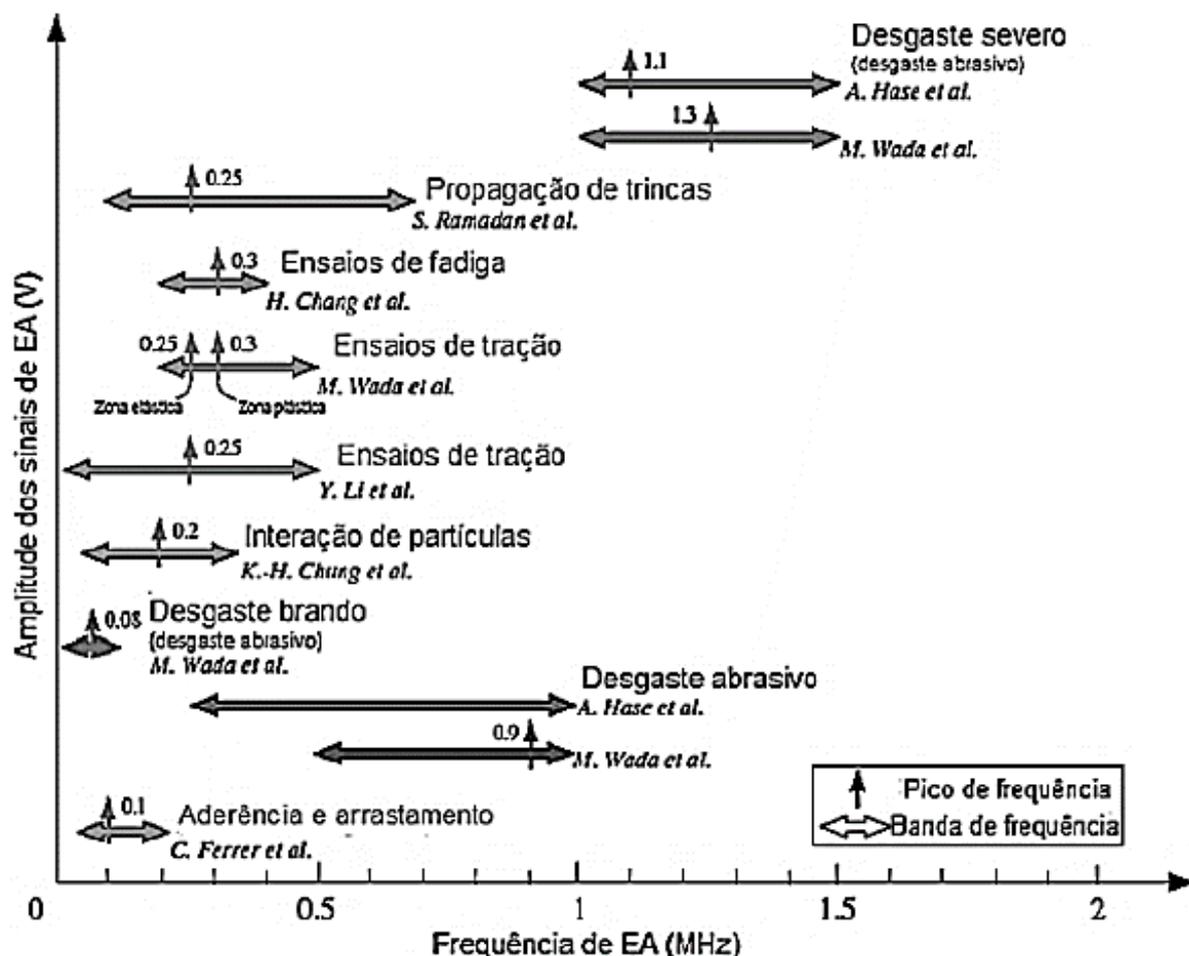
Considerando uma superfície sólida, ou precisamente uma interface ou sólido-gás ou sólido-líquido, tem-se uma estrutura e propriedades complexas e dependentes da natureza dos sólidos, do método de preparação da superfície e sua interação com meio ambiente. As propriedades das superfícies sólidas são cruciais para a interação da superfície uma vez que afetam a área real de contato, atrito,

desgaste e lubrificação. Além das funções tribológicas, as propriedades da superfície são importantes em outras aplicações, como desempenho óptico, elétrico e térmico, pintura e aparência.(Bhushan, 2013)

Vários processos mecânicos e físico-químicos ocorrem em pontos de contato reais no atrito de sólidos. Alguns deles são semelhantes aos processos que ocorrem na deformação e danos de materiais, outros processos são específicos para fricção. Por esse motivo, os sinais acústicos em fricção resultam principalmente dos mesmos fenômenos quanto ao carregamento mecânico e falha dos materiais, considerando os recursos específicos da operação do par de fricções. A principal característica distintiva da emissão acústica em fricção é a presença de fontes adicionais em comparação com a deformação e a falha. Essas fontes resultam de processos de execução rápida que ocorrem por fricção. Entre eles estão a interação elástica das asperezas da superfície de fricção (por exemplo, colisões de asperezas), processos químicos, incluindo corrosão que acompanham a fricção em muitos casos, e a formação e ruptura das junções de adesão. (Baranov et al.,2007)

Hase et al. (2012) estudou a relação dos sinais de EA e suas propriedades com os mecanismos de desgaste que eventualmente atuam nos materiais. A demonstra esses estudos feitos com a representação de um gráfico onde constam as bandas de frequência e valores de amplitude de tensão coletados dos sinais de EA de cada mecanismo de desgaste. Os autores ainda afirmam que cada mecanismo gera EA com espectro de frequência característico, e que este apresenta independência em relação à natureza dos materiais, mas dependência em relação à natureza do fenômeno.

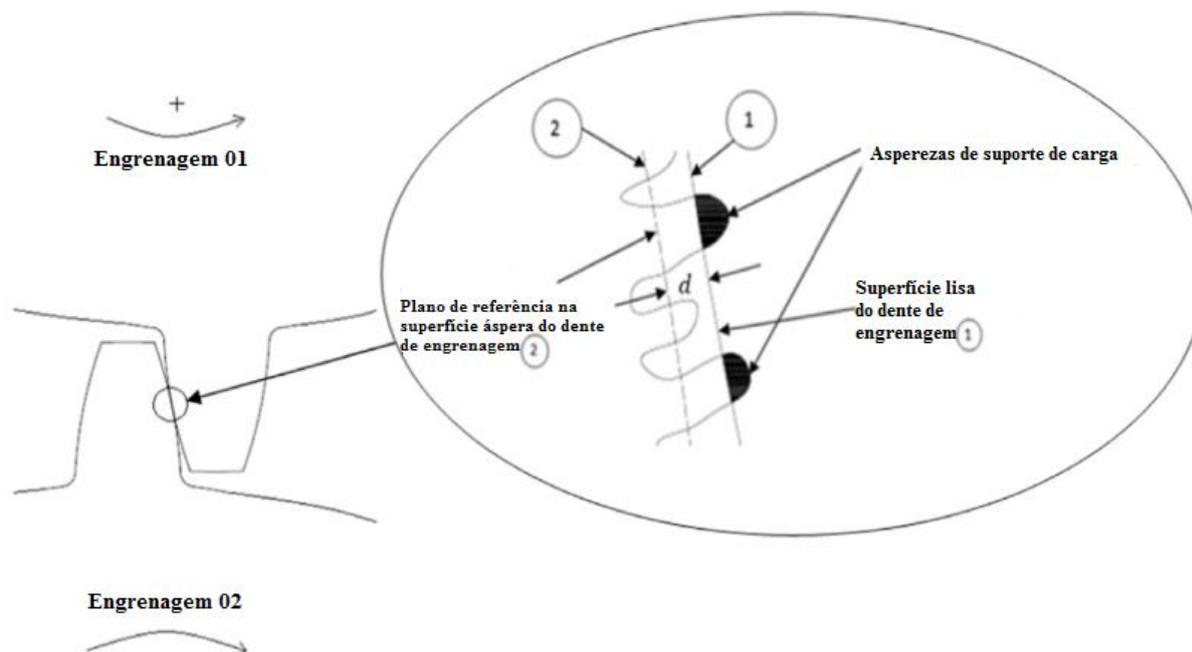
Figura 12 - Mapa que relaciona espectro de frequência de EA por fenômeno



Fonte: Hase et al. (2012)

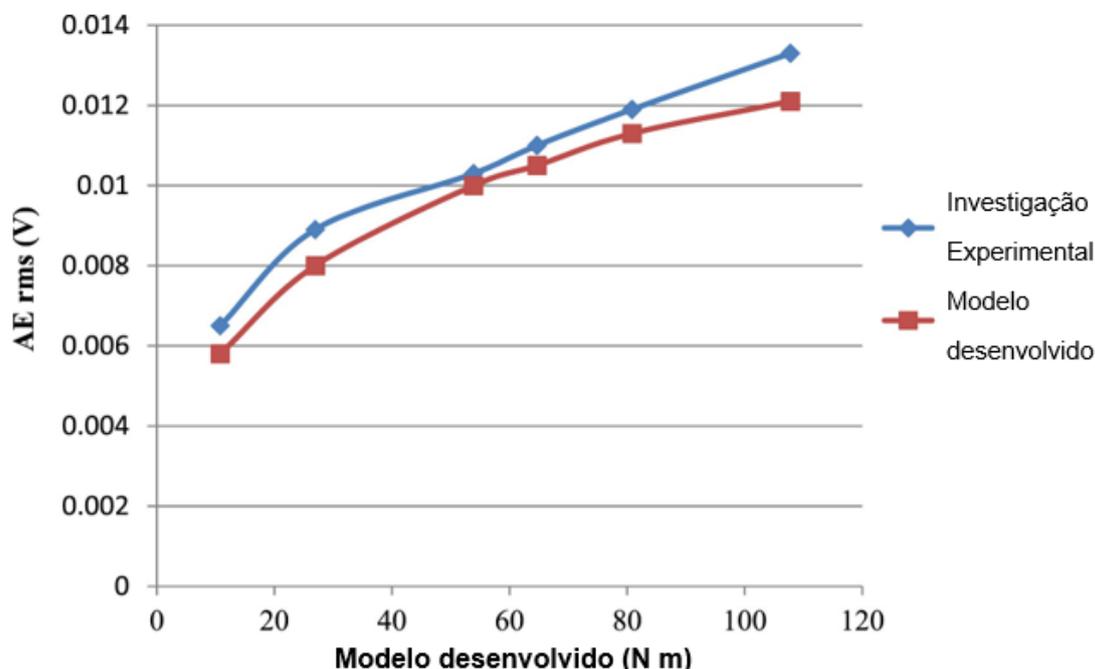
Tratando especificamente do acoplamento em engrenagens, Sharma et al. (2017a) apresenta a hipótese de que o contato entre as asperezas é o responsável por produzir parte dos sinais de EA durante o deslizamento. Dessa forma, características da onda como RMS e contagem de picos, podem ser diretamente relacionadas. Desenvolvendo a ideia, o autor elabora um modelo teórico baseado nas proposições mostradas na Figura 13, em que se discute sobre as interações entre as asperezas dos pares acoplados.

**Figura 13 - Deformação das asperezas no ponto de contato**



**Fonte:** Sharma et al. (2017a)

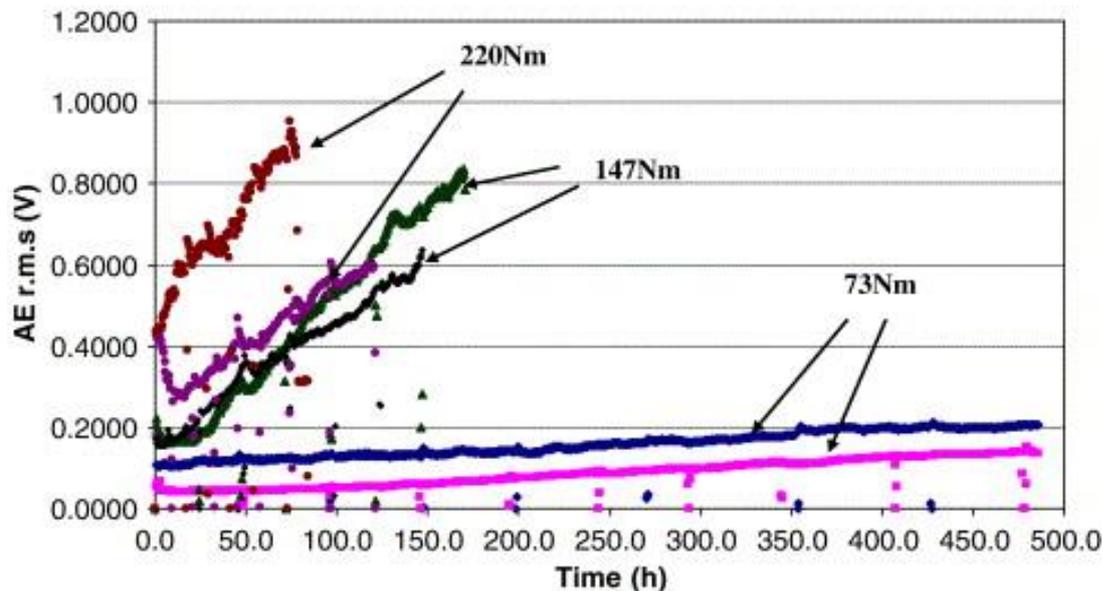
O modelo proposto, baseado em uma formulação considerando variáveis como módulo de elasticidade, leis de atrito e carga, foi então comparado com um teste de desempenho a 1000 rpm e condições de carregamento distintas aplicadas por um braço de alavanca em que se depositou pesos. A validação obtida pode ser exibida na Figura 14, em que graficamente o autor exprime os resultados experimentais e teóricos. Inferiu-se então em uma relação direta entre o carregamento aplicado ao valor de RMS, considera-se assim que o modelo matemático proposto traduz, em parte, o sinal de EA resultante. Em parte, o autor justifica as diferenças das curvas pela incapacidade de um modelo matemático de prever todas as relações de contato e a condição dos materiais envolvidos

**Figura 14 - Relação entre RMS teórico e prático com a carga aplicada**

Fonte: Sharma et al. (2017a)

Em um estudo próximo ao previamente apresentado, Tan et al. (2007) realiza um estudo comparativo sobre a capacidade de diagnóstico das técnicas de emissão acústica (EA), vibrações e espectrometria de óleo em engrenagens. Parte fundamental do procedimento, segundo o autor, está na colocação do sensor de EA próximo ao objeto analisado, e assim o mesmo foi instalado próximo a uma das engrenagens analisadas. Os testes realizados aconteceram a uma rotação constante de 745 rpm e com torque de 220,147 e 73 N.m, sendo realizado um total de dois testes para cada condição. Em intervalos regulares realizou-se uma inspeção visual do dano com critério de fim de teste em 50% da área afetada por desgaste definido como pitting. A Figura 15 exhibe a variação do sinal RMS no decorrer do tempo de teste. Segundo o autor, mesmo que as dispersões não sejam coincidentes, uma vez que a técnica é sensível a pequenas alterações nos conjuntos, considera-se a tendência de comportamento da análise por RMS dada as cargas.

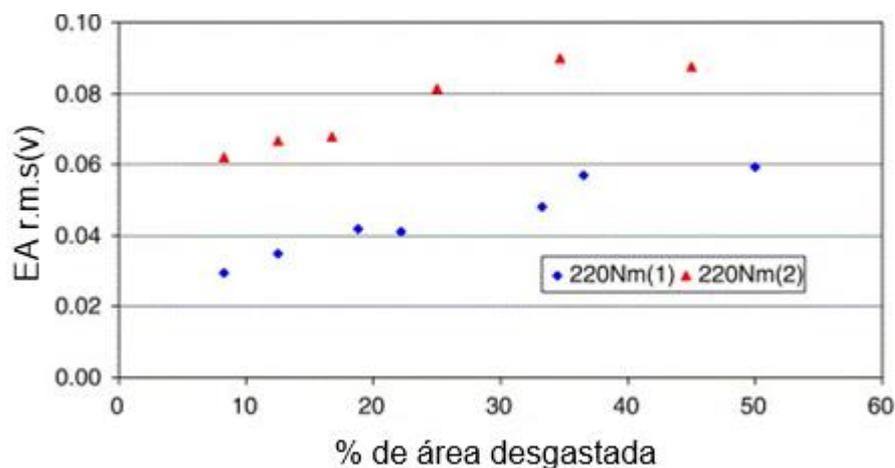
**Figura 15 - Variação do RMS durante testes comparativos**



Fonte: Tan et al. (2007)

O autor ainda exibe graficamente a comparação entre os dois testes de cada condição quando se analisa o valor do RMS em relação ao desgaste superficial. A Figura 16 exibe esta comparação para os testes realizados a 220 N.m. De forma análoga a comparação entre o tempo e RMS, volta-se a analisar a tendência do sinal, em teste de mesma carga, de manter certo paralelismo e certa similaridade.

**Figura 16 – Valores de RMS por área desgastada a 220 N**



Fonte: Tan et al. (2007)

De maneira geral, a técnica de coleta de EA se mostrou mais sensível a baixos torques e nos estágios iniciais se comparada as demais estudadas.

Considerando somente a análise do desgaste, pode-se avaliar o desempenho da EA em diversos tipos de aplicações mecânicas. Maia et al. (2015) elucidam sobre a aplicação da técnica para a previsão da vida de ferramentas de usinagem e detecção de mecanismos envolvidos no desgaste utilizando a forma da onda coletada, o espectro de frequência e a PSD.

Induzindo modificações por eletroerosão em uma série de brocas de aço rápido, Gómez et al. (2012) preconiza uma relação entre a medida da área abaixo do sinal retificado, a média do sinal e o torque, além de analisar a forma de onda. Entre as conclusões exibidas, cita-se a correlação entre o torque e o sinal de EA em condições de grandes esforços de corte, mas não em situações brandas. Cita-se ainda a condição de interpretação do sinal a fração constante foi interpretada como as interações do cavaco nos testes.

Utilizando EA na análise do corte por brunimento, Buj-Corral et al. (2018) aponta, de maneira divergente a outros autores, a utilização de um microfone com espectro de frequência coletável entre 40 Hz a 20 kHz optando por uma análise de sinal pelos métodos da Transformada Rápida de Fourier e pela Transformada de Hilbert-Houng. A avaliação da Função Intrínseca de Modo (IMF), quando comparada com a densidade das partículas abrasivas utilizadas, permite inferir sobre a capacidade de remoção de material, uma vez que apresentam a resposta abrasiva do sinal de EA.

A condição de remoção de matéria por abrasividade também é explorada por Dias et al. (2016), que monitora o sinal em um rebolo para acabamento de aços baixo carbono utilizando filtros e analisando pelo RMS, FFT e Wavelets. Concluindo que, dentro das técnicas analisadas, a wavelet exprime, de maneira mais direta, a possibilidade de não só o resultado das interações na peça, mas também em inferir sobre o estado de integridade do rebolo.

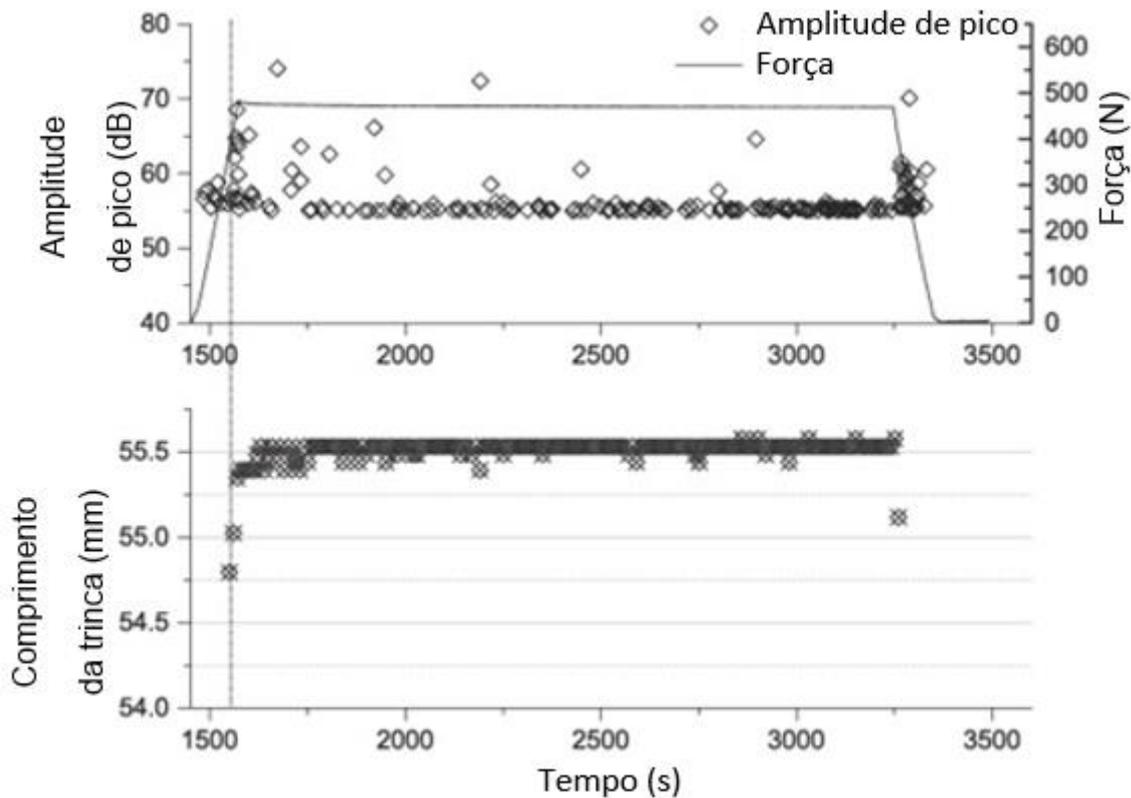
### **2.2.2. Emissão Acústica aplicada ao diagnóstico de falhas**

O entendimento do comportamento da EA no ciclo de crescimento de trincas está diretamente relacionado com os estudos do efeito Kaiser, pois permite a detecção da ocorrência de crescimento de trinca, mesmo que o incremento de crescimento seja pequeno demais para ser detectado visualmente. Foi proposto que, medindo o tempo em que os sinais são detectados e comparando com a carga

aplicada, é possível determinar durante qual parte do ciclo de carga o crescimento de trincas por fadiga realmente ocorre. (Pascoe et al. ,2018)

Pascoe et al. (2018) infere que o crescimento de trincas ocorreu sem qualquer linearidade visual com a curva tensão deslocamento, conforme mostrado na Figura 17.

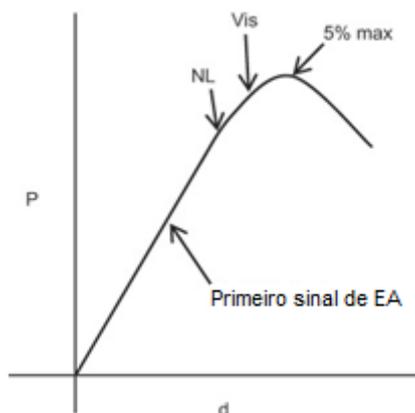
**Figura 17 - Crescimento de trinca a carga constante**



Fonte: `Pascoe et al. (2018)

O autor ainda apresenta na Figura 18 a curva  $\sigma \times \epsilon$  destacando pontos específicos do comportamento do sinal de EA dada a solicitação do ensaio. Destaca-se como início das emissões uma seção intermediária do regime elástico, entretanto as primeiras trincas são reportadas após o início da não linearidade(NL) se tornando visíveis(VIS) após o ponto destacado no regime plástico.

**Figura 18 - Gráfico tensão deformação**

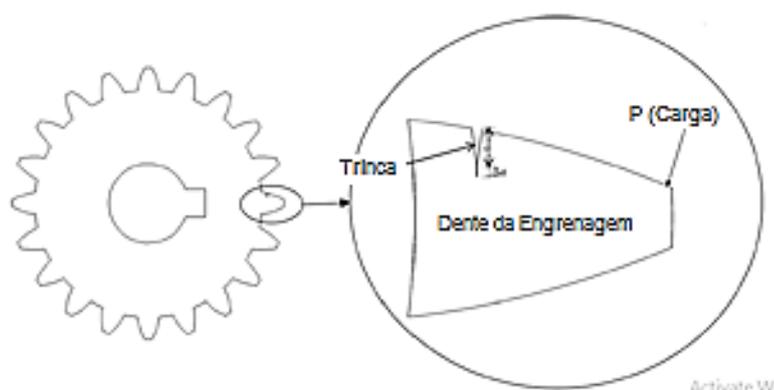


Fonte: Pascoe et al. (2018)

Dessa forma, Pascoe et al. (2018) concluem que a EA oferece uma forma de resolver a dificuldade em visualizar o início da formação de trincas em situações de carregamento quase estáticos.

Em condições dinâmicas, Sharma et al. (2017) propõem uma modelagem matemática para o sinal de EA gerada pela propagação de trincas em engrenagens. A Figura 19 mostra a variação das trincas induzidas no modelo, com variação de comprimento entre 1,6 a 2,6 mm e incremento de 0,2 mm.

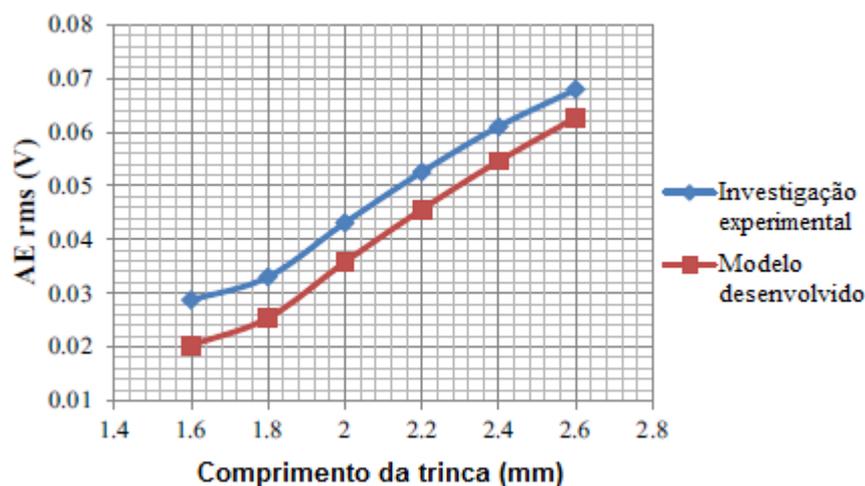
**Figura 19 - Modelo de propagação de trinca**



Fonte: Sharma et al. (2017)

Os resultados dos testes são expressos na Figura 20 em que se compara os procedimentos experimentais com o modelo matemático proposto.

**Figura 20 - Comparação modelo matemático de trincas**

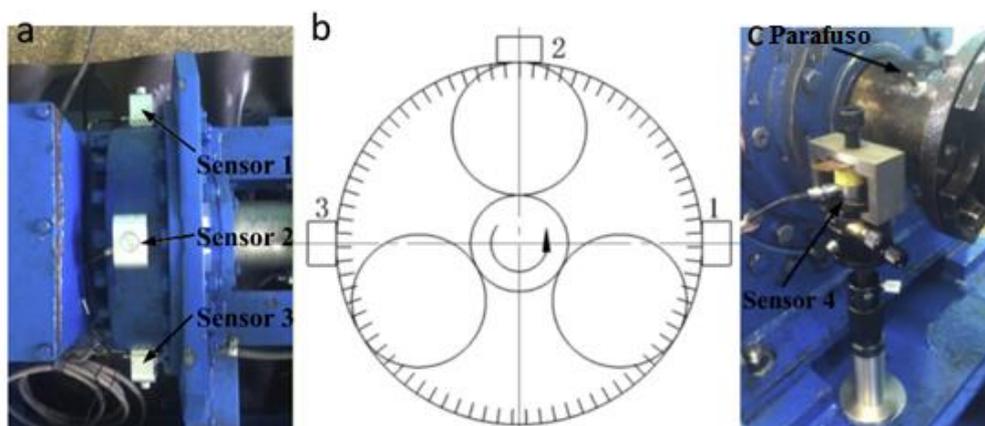


Fonte: Sharma; Parey (2017)

Como parte do estudo, Sharma et al.(2017) concluíram que o modelo matemático proposto estabelece a base teórica para correlacionar as características do EA da fratura, parâmetros a partir da perspectiva de evento de fratura na engrenagem e, portanto, fornece uma base para entender o mecanismo físico real de EA durante o incremental em engrenagens.

Considerando a localização da falha, Zhang et al. (2017) realizaram testes para o diagnóstico de falhas em caixas de engrenagens aplicadas a turbinas eólicas. O procedimento experimental utilizou 4 sensores do tipo R15a dispostos conforme a Figura 21.

**Figura 21 -Posicionamento dos sensores para localização de falhas**



Fonte: Zhang et al. (2017)

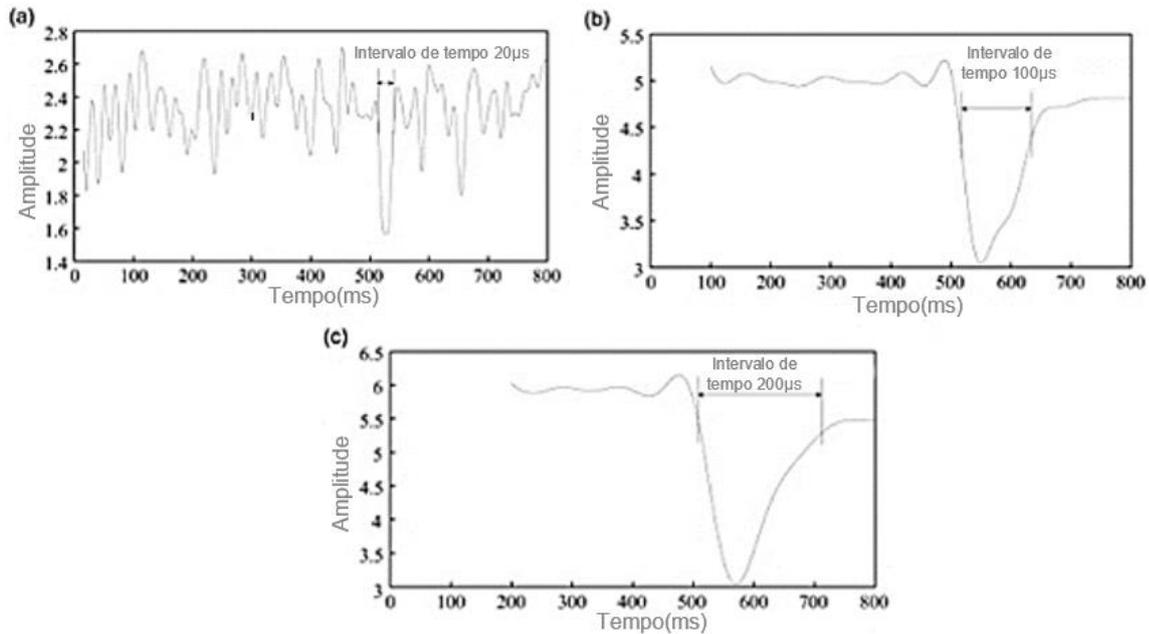
As montagens propostas para os sensores, exibidos na Figura 21(a), obedecem a uma distribuição anti-horária defasados em  $90^\circ$ , conforme mostrado na Figura 21(b). Sobre o ponto na qual se induziu a falha, posicionou-se um pino, visualizado em Figura 21(c), que tem como função contar as rotações e, ao entrar em contato com o sensor 4, gerar o sinal de EA resultante da interação com a falha.

Os autores propõem um modelo de localização baseado na propagação da onda no meio. Para tanto, analisou-se a forma de onda até as frequências de 250 kHz. Os indicadores obtidos permitiram a localização, entretanto, em condições práticas, não se validou a metodologia.

Considerando a possibilidade de se detectar falhas por análise da onda, Zhang et al. (2015) como alternativa as técnicas de interpretação dos fenômenos acústicos. Utilizando um sistema esquemático de trilho e roda, o autor divide os procedimentos entre a criação de um dispositivo que simule o contato entre as partes, um sistema de coleta modelo Vallen AMST-6 e um sensor com pre-amplificação de 34dB .

Entre os pontos fundamentais propostos pelo autor está a influência da velocidade de teste no resultado da coleta de EA, de forma que os métodos de processamento precisam contar com uma análise específica dos pontos de falha. Isolando somente as condições de baixa velocidades. A Figura 22 exhibe a relação entre as janelas de cálculo e entropia espectral, ou entropia de Shannon, com os trilhos operando a 12km/h observa-se que a medida que as janelas de cálculo são elevadas o ruído passa ser menos representativo, condição nítida em 26(a), em que a janela de  $20\mu\text{s}$  expõem todo o comportamento de influência do ruído, já em 26(b), em que a janela de cálculo é aumentada e 5 vezes, o ruído passa a ser menos significativo, tal análise se entende a 26(c) em que o sinal parece sofrer menor influência de quaisquer mecanismo que não seja a falha mapeada.

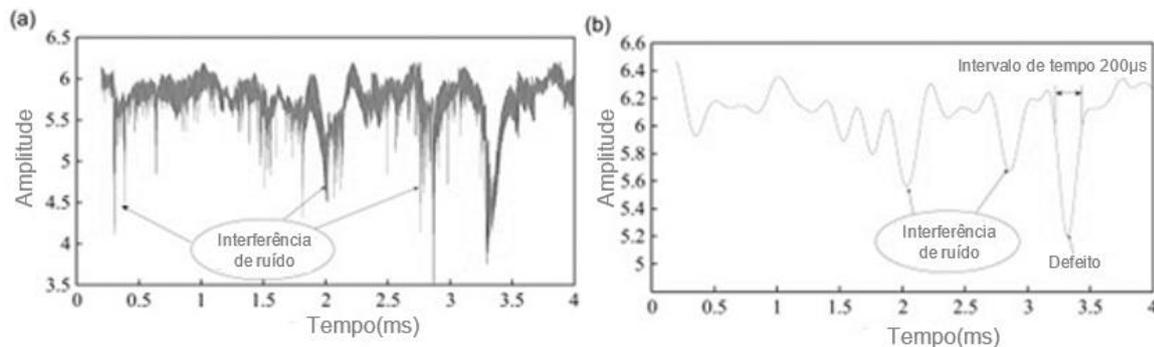
**Figura 22 - Entropia espectral em diferentes janelas de tempo**



Fonte:Zhang et al. (2015)

Zhang et al. (2015) ainda observa que a sensibilidade da técnica a velocidades elevadas pode gerar serias interferências na composição do sinal, uma vez que o nível de ruído gerado tende a ser proporcional. A Figura 23 expõe a condição de teste a 124 km/h, observa-se a influência dos picos de ruído na interpretação do sinal, podendo gerar uma variedade de falsos positivos.

**Figura 23 - Entropia espectral em altas velocidades de contato**



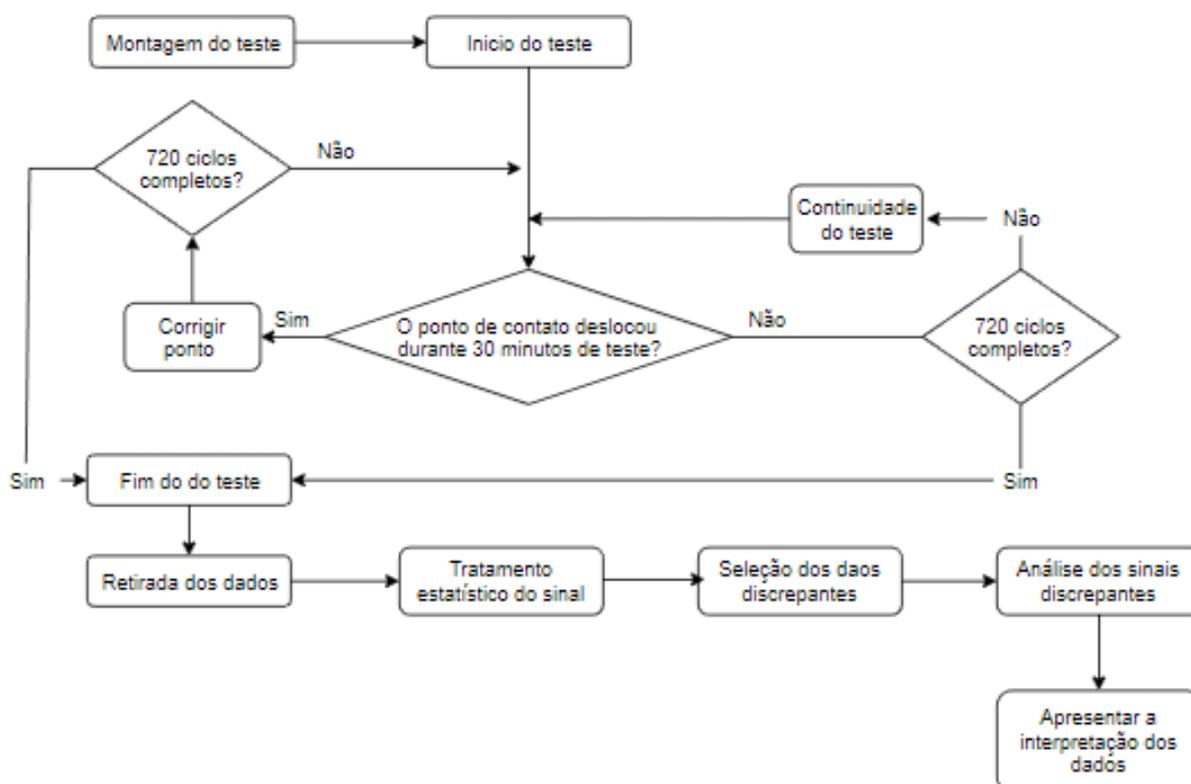
Fonte:Zhang et al. (2015)

O autor define a melhor janela de análise como a de 200µs baseada na interferência do ruído diante da variação do sinal na situação de falha detectada/induzida. Registra-se ainda a necessidade de refino quanto a severidade da influência do ruído.

### 3. METODOLOGIA

Considerando a necessidade de se avaliar o comportamento do sinal de EA em um conjunto pinhão cremalheira, elaborou-se uma metodologia centrada na caracterização do sinal, e posteriormente teste de comportamento do mesmo quando e exposto a algumas variantes condicionais. A Figura 24 apresenta o fluxograma relativo a metodologia utilizada na rotina de testes.

**Figura 24 - Fluxograma do procedimento experimental**



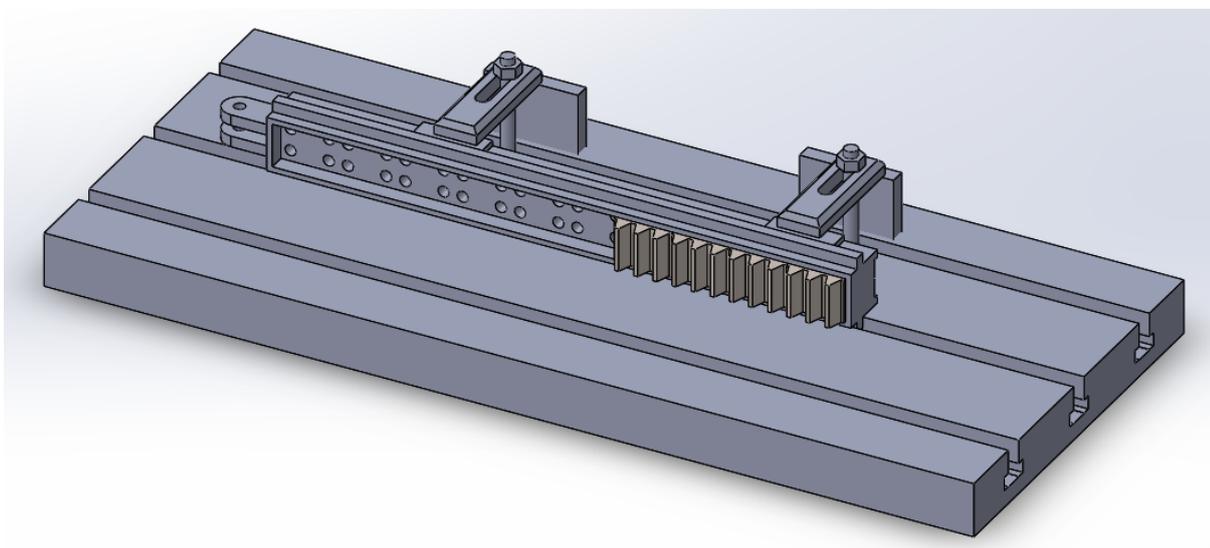
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Considera-se assim a necessidade de detalhar as condicionais analisadas, descrevendo as variáveis envolvidas e os parâmetros adotados. Soma-se o detalhamento dos recursos e estruturas utilizadas além das técnicas de processamento de sinais escolhidas para as análises quantitativas e qualitativas do sinal de EA.

### 3.1. Condições de teste

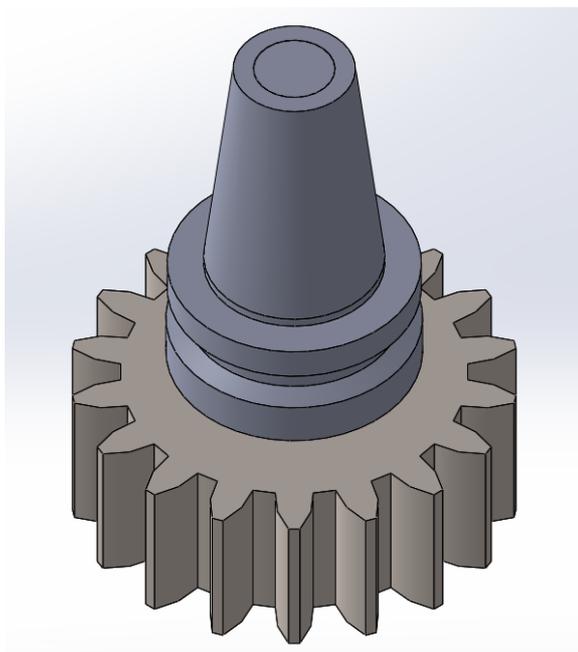
A fim de efetuar os testes necessários, efetua-se uma adaptação em um centro de usinagem Romi Discovery 560D baseada na fixação de uma plataforma guia, esta responsável por manter alinhado os módulos da cremalheira. Um esquemático da montagem é apresentado na Figura 25, destaca-se que a fixação foi estabelecida no rasgo central como meio de considerar desprezível eventuais desvios geométricos.

**Figura 25 - Adaptação para fixação da cremalheira**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

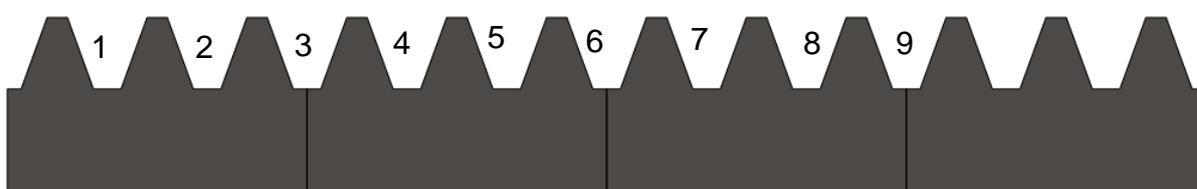
Quanto ao pinhão, após a usinagem do perfil dentado efetuou-se dois rebaixas nas laterais em dimensões capazes de alojar um par de rolamentos e posteriormente, em um ajuste por interferência, instalou-se um eixo. O conjunto descrito foi montado junto a um cone específico do centro de usinagem, garantindo a concentricidade das partes. Destaca-se que os rolamentos garantiram a liberdade de movimento do pinhão em relação ao eixo arvore e reduziram eventuais atritos.

**Figura 26 – Adaptação para fixação do pinhão**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Ponderando sobre a necessidade de analisar o sinal de Emissão Acústica (EA) inerente ao sistema adotado, fragmentou-se o teste em 4 etapas distintas de operação. A primeira etapa foi responsável por avaliar o sinal sem alterações geométricas, a segunda e a terceira emularam as condições de desgaste e trinca, respectivamente, seguida das progressões também emuladas. Por fim, a última etapa alterou-se as condições previamente estabelecidas para comparação.

A operação do centro de usinagem possui um ciclo de repetição quando se aplica a função PASSE. Os testes de controle e as etapas de desgaste e trinca foram efetuados sob o mesmo critério, em que que o pinhão descreveu um total de 139,23 mm entre o primeiro intervalo de contato até nono intervalo, com a coleta realizada no sexto intervalo, conforme apresentado na Figura 27, o equipamento operou a  $139,23 \text{ mm}/\text{min}$  resultando em um tempo de ciclo de um minuto.

**Figura 27 - Representação dos módulos montados**

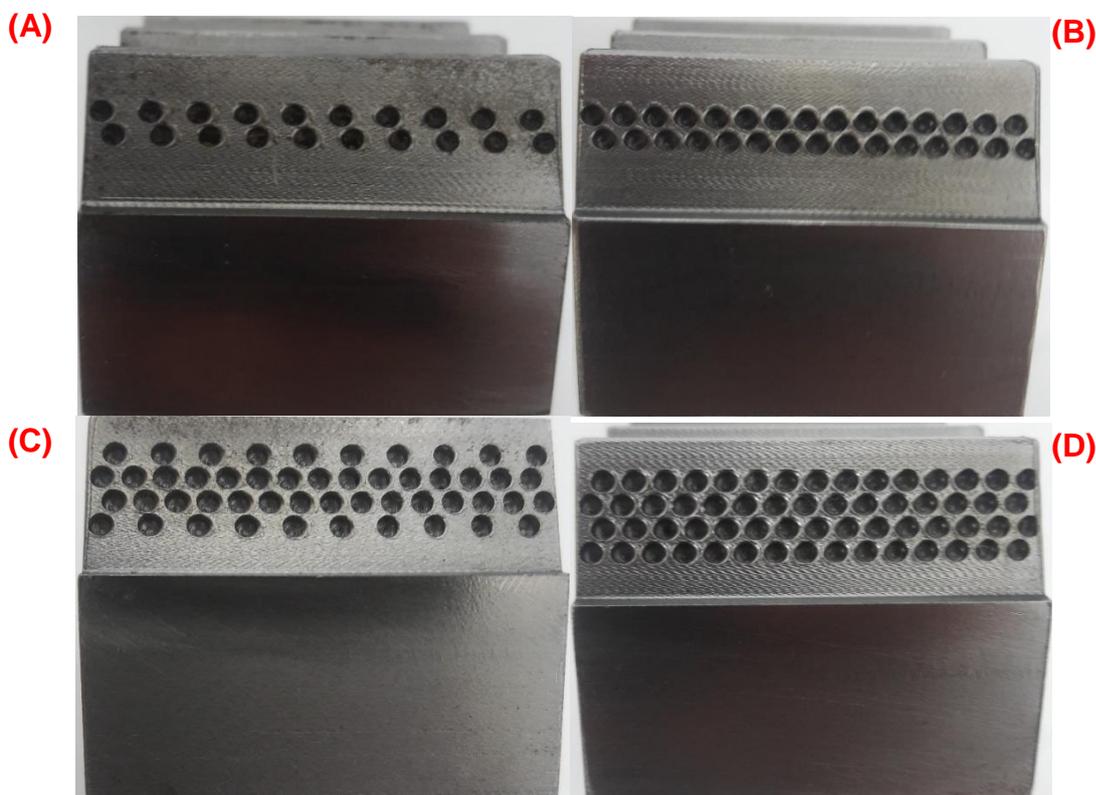
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Quanto a ultima etapa de testes, optou-se pelo aumento da distancia da cremalheira, o que resultou em um comprimento de 278,46 mm entre o primeiro intervalo e o fim da mesma. A velocidade de teste foi também aumentada para  $1113,84^{mm}/_{min}$  com a coleta sendo realizada no nono intervalo de um total de 18.

O procedimento experimental dos 3 primeiros testes foi efetuado em 24 horas teste, com ajuste de ponto de coleta de 30 em 30 minutos, afim de evitar distorções por pequenas variações de avanço, aplicou-se ainda uma lubrificação inicial por graxa para engrenagens e a reaplicou após 12 horas. O último teste foi efetuado em um total de 72 horas, seguindo as mesmas demandas de ajuste e lubrificação.

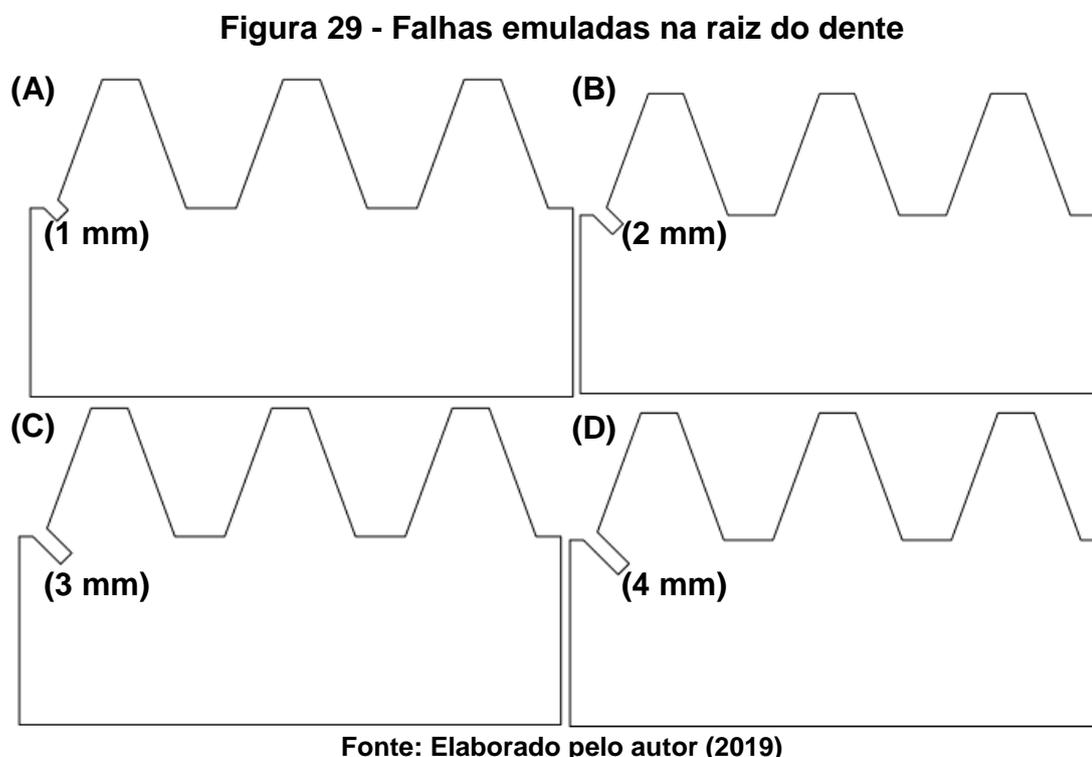
Considerando as falhas emuladas para a condição de desgaste, efetuou-se uma serie de furos na superfície de contato ,de maneira análoga a efetuada por Liang et al. (2016) em seu modelo computacional. A dispersão dos furos e feita ao redor da linha de ação, as quatro condições são vistas na Figura 28. Observa-se em (A) a condição de emulação com 20 furos, em (B) efetuou-se 30 furos, em (C) fabricou-se com 50 furos e por fim 60 furos em (D), sendo este ultimo adotado também na ultima condição de teste.

**Figura 28 - Superfícies de desgaste emulado**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

As falhas emuladas evoluíram de 1 em 1 mm, usinadas com uma fresa de 1,5 mm a 45° na raiz do dente. Em (A) exibe-se a condição em 1 mm evoluindo até 4 mm em (D).



Tendo em vista as 8 condições propostas e os parâmetros apresentados, os testes foram conduzidos primeiramente como uma condição de controle, sem nenhuma alteração na topografia do dente, posteriormente efetuou-se os testes de desgaste por fim os testes de falha.

### 3.2. Processamento do sinal coletado

Tendo em vista o processamento do sinal de EA resultante das interações adotadas como objeto de estudo, considerou-se a divisão entre os métodos de análise entre seis técnicas de processamento do sinal capazes de retornar uma única variável numérica referente ao sinal de EA. Dessa forma, desenvolveu-se uma lógica em Matlab R2018a, processando assim o sinal em intervalos de hora em hora.

A resposta pode ser dividida em variáveis puramente estatísticas, como o RMS, Curtoses e Skewness, em variáveis de análise da energia do sinal, como a

PSD e Potencia de banda, e pôr fim a Entropia espectral. Entretanto, o volume de dados impediu a análise unitária dos dados, uma vez que cada condição gerou 1440 sinais para as 3 primeiras baterias de teste e 4320 para o ultimo teste.

Para o maior aproveitamento das informações, optou-se por um pré-filtro dos dados, isolando somente a metade dos dados referentes ao contato pinhão falha. Conforme exibido na Figura 30, os dados forma organizados em forma de tabela por variável calculada, seguindo o critério de Chauvenet, efetuou-se os cálculos necessários. Entretanto, para gerar uma distribuição continua dos dados, aqueles considerados como Falsos foram substituídos na distribuição pelo valor médio e marcados para análise do que resultou a discrepância.

**Figura 30 - Organização dos dados calculados**

Ciclos	Controle - RMS				
	Controle	(X-Xmedia)	r	Teste	Controle
1	0,003336492	7,97065E-05	0,028723372	VERDADEIRO	0,003067257
2	0,003411298	0,000154513	0,05568092	VERDADEIRO	0,003067257
3	0,003386887	0,000130102	0,046883994	VERDADEIRO	0,003067257
4	0,00372007	0,000463285	0,166951189	VERDADEIRO	0,003067257
5	0,003358389	0,000101603	0,036614212	VERDADEIRO	0,003067257
6	0,003307555	5,07693E-05	0,018295421	VERDADEIRO	0,003067257
7	0,003290013	3,32274E-05	0,011973961	VERDADEIRO	0,003067257
8	0,003270777	1,3991E-05	0,005041841	VERDADEIRO	0,003067257
9	0,003252335	-4,45047E-06	0,001603791	VERDADEIRO	0,003067257
10	0,003253951	-2,83482E-06	0,001021566	VERDADEIRO	0,003067257
11	0,003229052	-2,77337E-05	0,009994243	VERDADEIRO	0,003067257
12	0,003199807	-5,69785E-05	0,020533024	VERDADEIRO	0,003067257
13	0,003171946	-8,48393E-05	0,030573062	VERDADEIRO	0,003067257
14	0,003152691	-0,000104095	0,037512053	VERDADEIRO	0,003067257
15	0,003149235	-0,00010755	0,038757212	VERDADEIRO	0,003067257
16	0,003258083	1,29718E-06	0,000467457	VERDADEIRO	0,003067257
17	0,003152407	-0,000104379	0,037614449	VERDADEIRO	0,003067257
18	0,00473517	0,001478384	0,532756741	VERDADEIRO	0,003067257
19	0,007454429	0,004197643	1,512680317	VERDADEIRO	0,003067257
20	0,003152968	-0,000103818	0,037412183	VERDADEIRO	0,003067257
21	0,076766767	0,073509982	26,4903639	FALSO	0,003067257
22	0,003173522	-8,32635E-05	0,030005177	VERDADEIRO	0,003067257
23	0,003122113	-0,000134673	0,048531154	VERDADEIRO	0,003067257
24	0,003115965	-0,000140821	0,050746813	VERDADEIRO	0,003067257

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

### 3.3. Recursos

OS testes foram conduzidos com auxilio de uma Fresa para usinagem CNC modelo Romi Discovery 560, com comando numérico modelo Sinumerik 810D de fabricação da Siemens . O curso da mesa e de 510 mm, e os rasgos tem tolerância de fábrica de  $\pm 0,05$  mm

Quanto a coleta do sinal pretende-se adotar computador AMD Fusion A8 quad-core 2,9 GHz com cache de 4Mb, placa de vídeo Vison Radeon HD6550D e 8gb de memória RAM DDR31333 e 1 TB de Hd, conectado a uma placa da National Instruments modelo PCI-6251. Adota-se ainda um condicionador de sinais da Marca Physical Acoustics, modelo Spartan 2000. Os fenômenos são percebidos por um transdutor piezoelétrico da Physical Acoustics, modelo R15i. O equipamento destacado para a análise dos dados e a interpretação da rede de diagnóstico é um modelo Dell XPS Corei7, possuindo 4 núcleos e 8 processadores, 16 GB de RAM e 1TB de Hd. Os sinais serão processados com auxílio do Matlab versão 2018.

A verificação por imagem da condição dos dentes da cremalheira e do pinhão será feita com auxílio de uma lupa modelo Discovery V8, fabricada pela Zeiss, com câmera AxioCAM ERc5s. A captura da imagem será executada por um computador com processador Inter® core™2duo com 4 GB de RAM. O software responsável pelo processamento da imagem é o AxioVision Leg4.



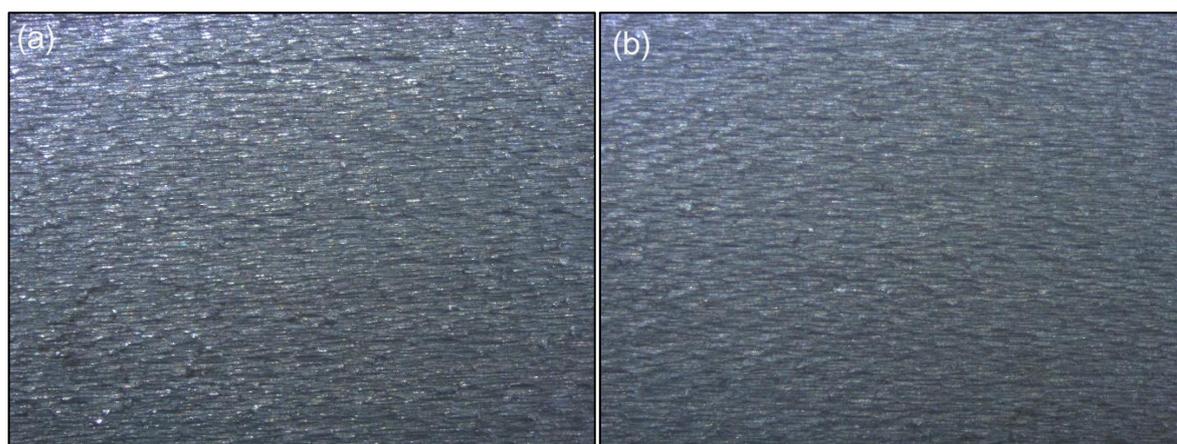
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se os resultados categorizadas e 3 frações referentes a condição do conjunto analisado. O primeiro conjunto compete a condição de controle, em que os dados coletados serão tratados e posteriormente comparados. O segundo e terceiro conjuntos competem ao desgaste e a trinca na raiz do dente, respectivamente, sendo as duas condições induzidas mecanicamente, gerando assim 4 estágios de progressão.

### 4.1. Análise da condição de controle

Seguindo a metodologia proposta, o teste foi efetuado sem maiores intercorrências tanto na interação pinhão cremalheira quanto na coleta dos sinais. A Figura 31 apresenta uma ampliação da mesma região da cremalheira, em (a) destaca-se o estado inicial do dente em que se coletou o sinal e em (b) a condição ao fim do teste. A análise visual da ampliação não apontou trincas, deformações ou desgaste perceptíveis.

**Figura 31 - Condição da superfície nos testes de controle**

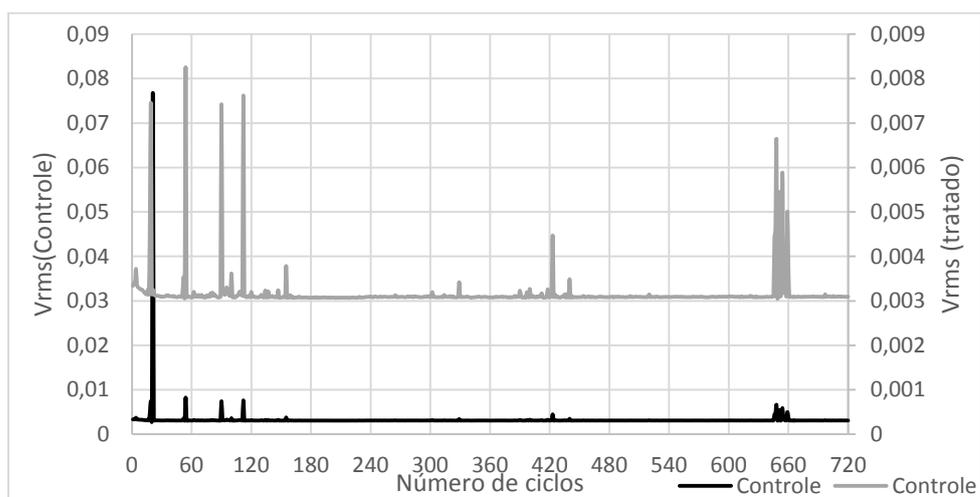


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Considerando os dados, a Figura 32 apresenta a dispersão dos cálculos de RMS na condição de controle, dessa forma, o eixo a esquerda reflete os dados em bruto e o a direita após o tratamento proposto. Considera-se a média dos valores de RMS em  $3,067257 \times 10^{-3}$  V, que posteriormente será utilizado como linha de

comparação entre os parâmetros analisados. De acordo com Tan et al. (2007), o comportamento do RMS tende a ser linear e proporcional a condição de desgaste e com a carga aplicada, dessa forma, o intervalo de tempo gerou um patamar de linearidade, uma vez que não houve desgaste significativo e sem alterações significativas de carga

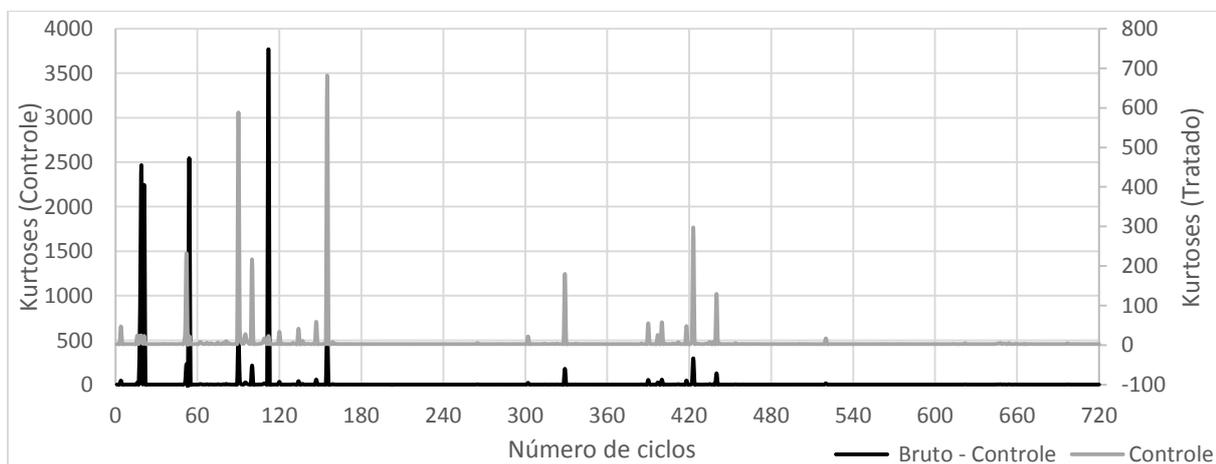
**Figura 32 – Dados em bruto e corrigidos quanto ao RMS**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

De maneira análoga, a Figura 33 dispõe a dispersão dos cálculos da Curtoses, na condição de controle, em que o eixo a esquerda reflete os dados em bruto e o a direita após o tratamento. Em desacordo com o proposto Jemielniak; Otman (1998), não houve uma sensibilidade maior da Curtoses quando comparada com a RMS,

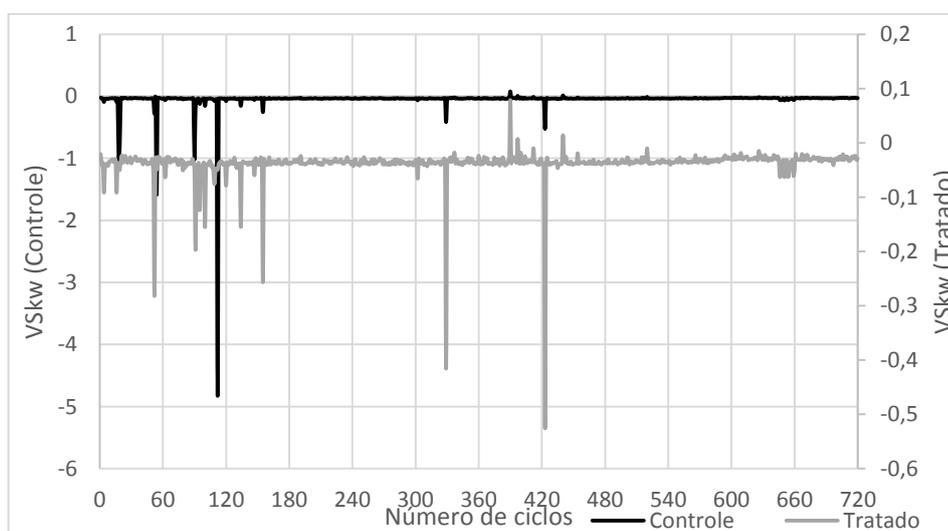
**Figura 33 – Dados da condição de controle quanto a Kurtoses**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 34 retrata a dispersão dos cálculos da Skewness do sinal na condição de controle, com o eixo a esquerda refletindo os dados em bruto e o a direita após o tratamento. Entre as técnicas apontadas em estudos clássicos, como o proposto Jemielniak; Otman (1998), a Skewness do sinal não convergiu com o proposto pelos autores no que diz respeito a maior sensibilidade comparada ao RMS.

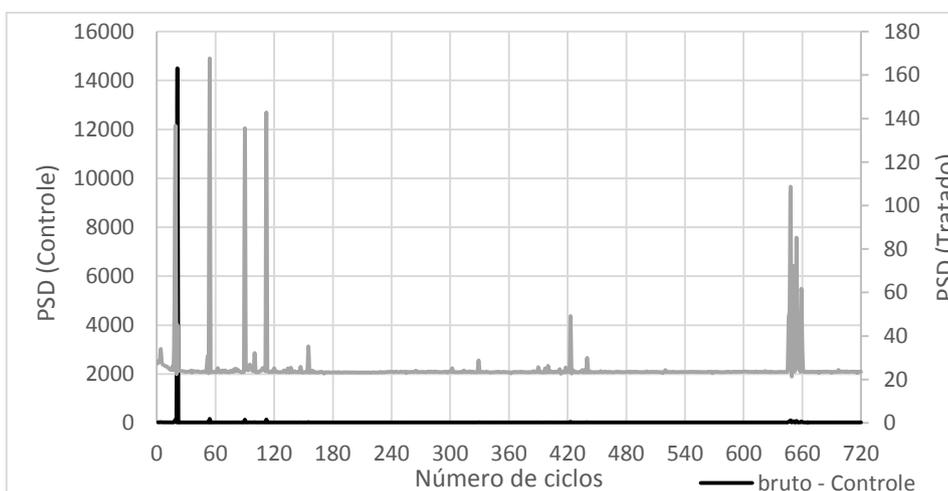
**Figura 34 – Dados da condição de controle quanto a Skewness**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 35 apresenta a dispersão dos cálculos da PSD do sinal na condição de controle, o eixo a esquerda indica os dados em bruto enquanto o a direita retrata a após o tratamento.

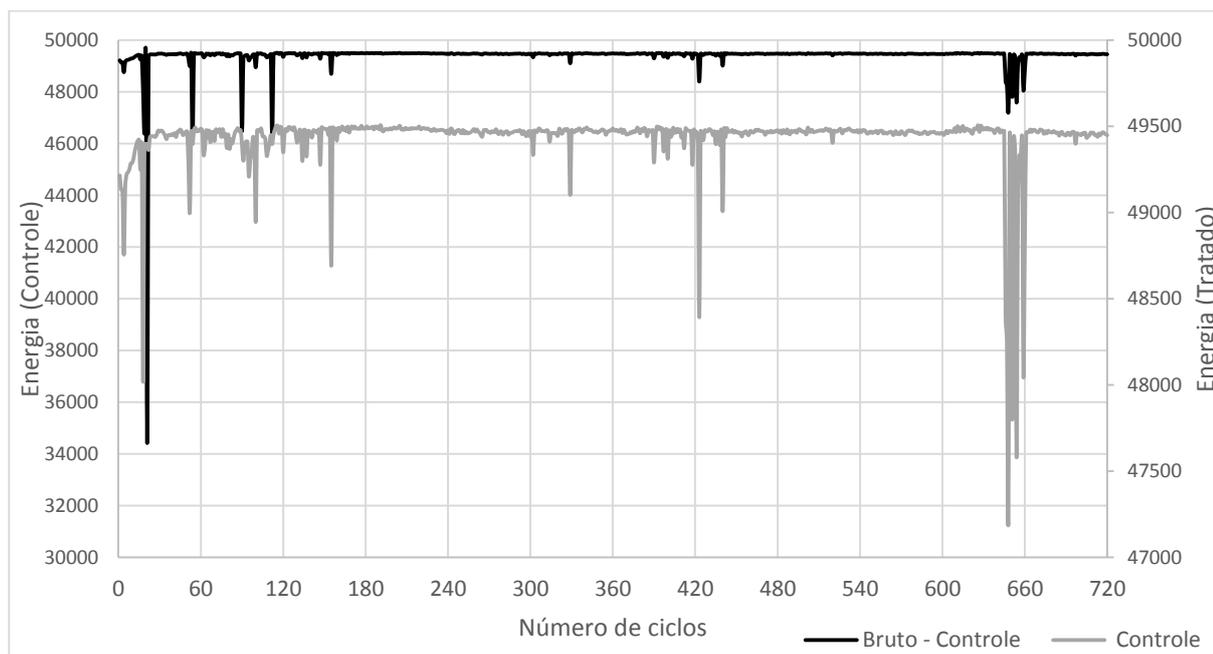
**Figura 35 – Dados da condição de controle quanto a PSD**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 36 exibe a dispersão da potencia de banda calculada na condição de controle, em que o eixo a esquerda se refere a energia na condição em bruto e a direita após o tratamento.

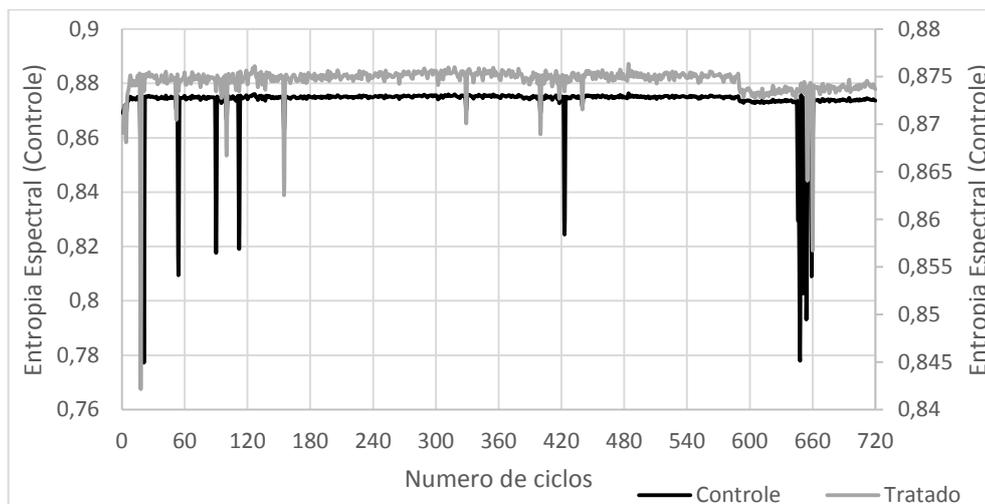
Figura 36 – Dados da condição de controle quanto a PSD



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 37 caracteriza a dispersão do dados calculados da Entropia Espectral na condição de controle, o eixo a esquerda refere-se a energia na condição em bruto e a direita após o tratamento. Como não existe patamar de comparação entre condições,

**Figura 37 – Dados da condição de controle quanto a Entropia espectral**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Seguindo os critérios estabelecidos para o tratamento de dados em bruto, considera-se os pontos de ajuste para uma análise mais detalhada sobre os motivos para a grande variação na técnica adotada. A Tabela 1 apresenta os dados para cada técnica adotada

**Tabela 1 - Pontos de análise no teste de Controle**

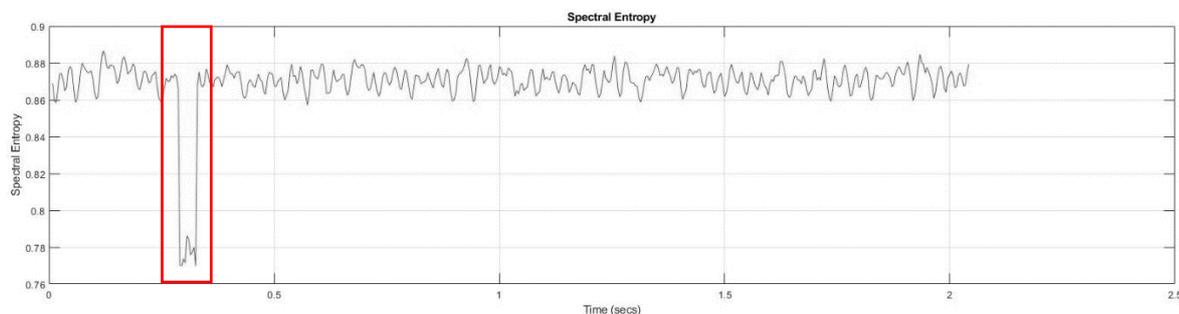
Controle	RMS	21
	Curtoses	18,19,21,54,112
	Skewness	18,19,54,90,112
	PSD	21
	Energia	56,79,170,421
	Entropia espectral	18,19,21,54,56,79,90,112,423,646,647,648,650,651,654,659

**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Considerando os dados do sinal de Emissão acústica(EA) resultantes do 18º ciclo de operação, detectou-se uma discrepância em 3 das técnicas adotadas, Curtoses, Skewness e Entropia Espectral(EE).Considerando a EE como primeiro mecanismo de análise do sinal, com dispersão gráfica apresentada na Figura 38 , observa-se uma queda brusca nos valores calculados de EE entre 0,2 a 0,4

segundo, o que segundo Zhang et al. (2015) pode indicar a incidência de uma falha no conjunto analisado.

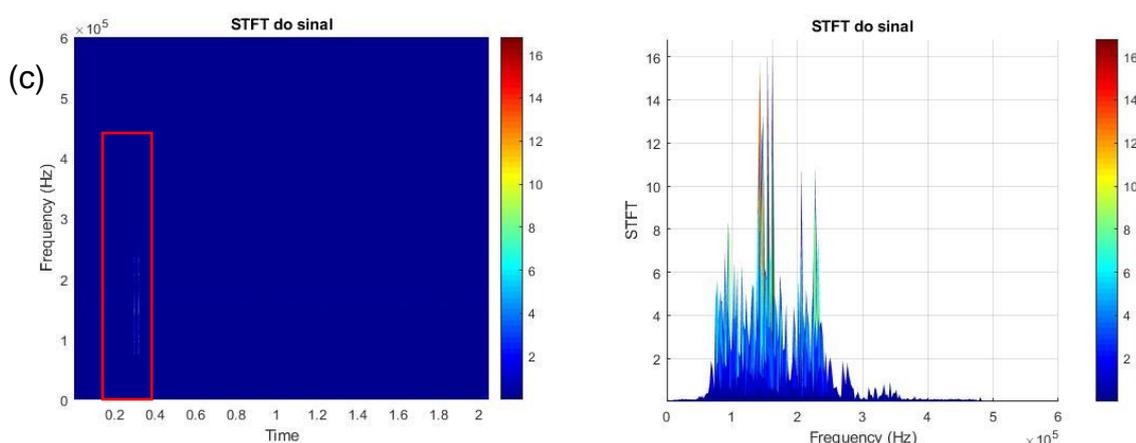
**Figura 38 – Análise da Entropia Espectral do sinal de EA no 18° ciclo**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Mesmo indicando um forte indicio de uma falha resultante no contato, a EE não reporta os mecanismos atuantes nem a característica do evento ocorrido. Dessa forma, aplica-se a análise da STFT do sinal de EA, visualizado na Figura 39, conforme realizado por Jakitsch et al. (2018) e Hao et al. (2018), reporta-se a mesma perturbação entre 0,2 a 0,4 segundos e ,adotando o mapa de frequências elaborado por Hase et al. (2012),infere-se na provável abertura de trincas entre as duas partes

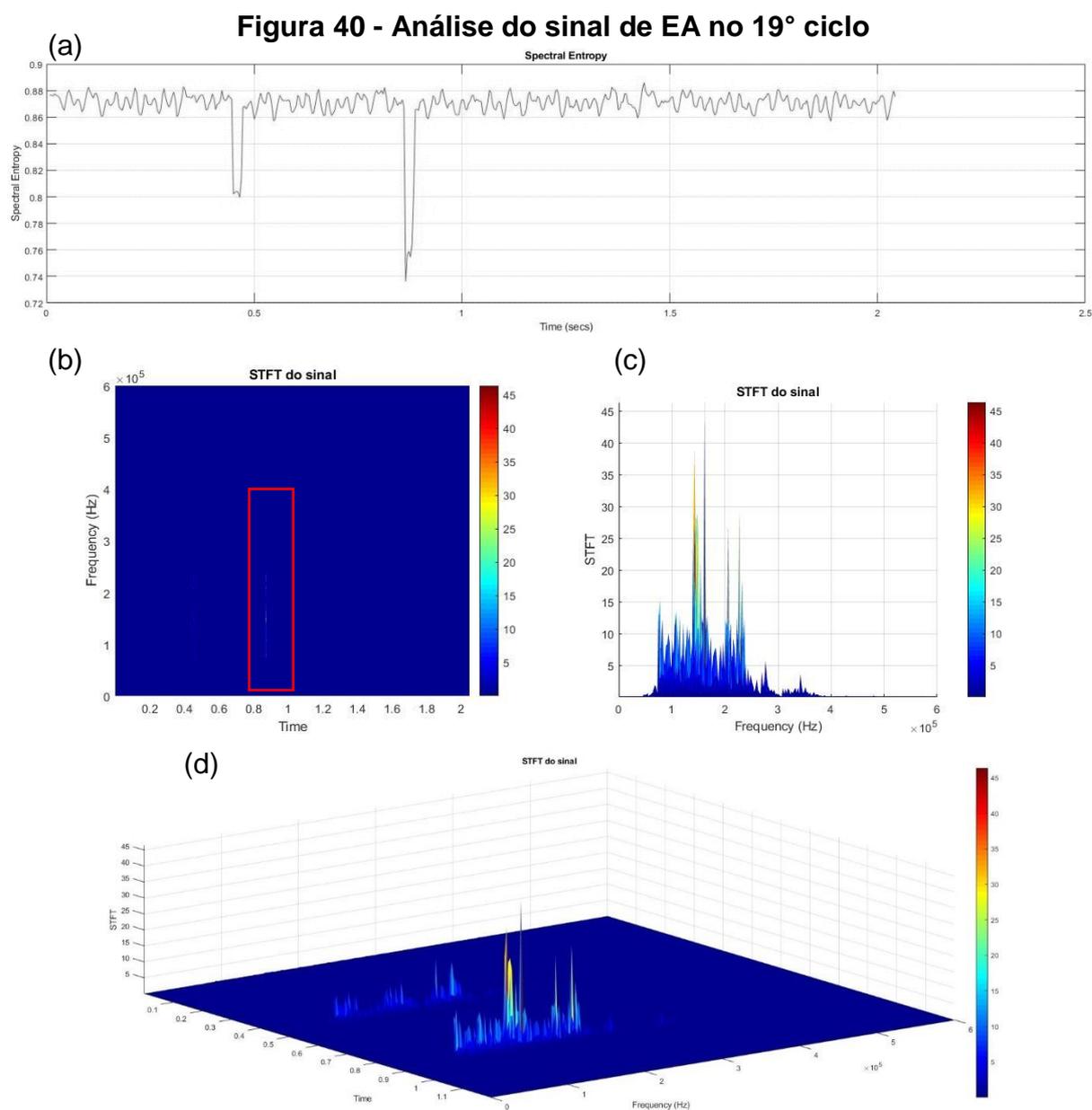
**Figura 39 - Análise da STFT do sinal de EA no 18° ciclo**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Apresenta-se na Figura 40 os dados do sinal de EA no 19° ciclo do teste de controle apontaram discrepâncias significativas nos tratamentos por Curtoses, Skewness e a Entropia Espectral. Observa-se na Figura 40(a),a EE no 19° ciclo de

operação, destaca-se a probabilidade de falha entre 0,8 a 1 segundo, entretanto, existe um pico entre 0,3 a 0,5 segundos, segundo Zhang et al. (2015), este ponto pode indicar um falso ponto de indicação de falha. Esta proposição tende a ser confirmada na interpretação da STFF observada na Figura 40(b) e (c), entretanto, ao analisar o sinal em uma janela mais curta de tempo e com um eixo diferenciado, observa-se picos que tendendo a confirmar as indicações de trinca.



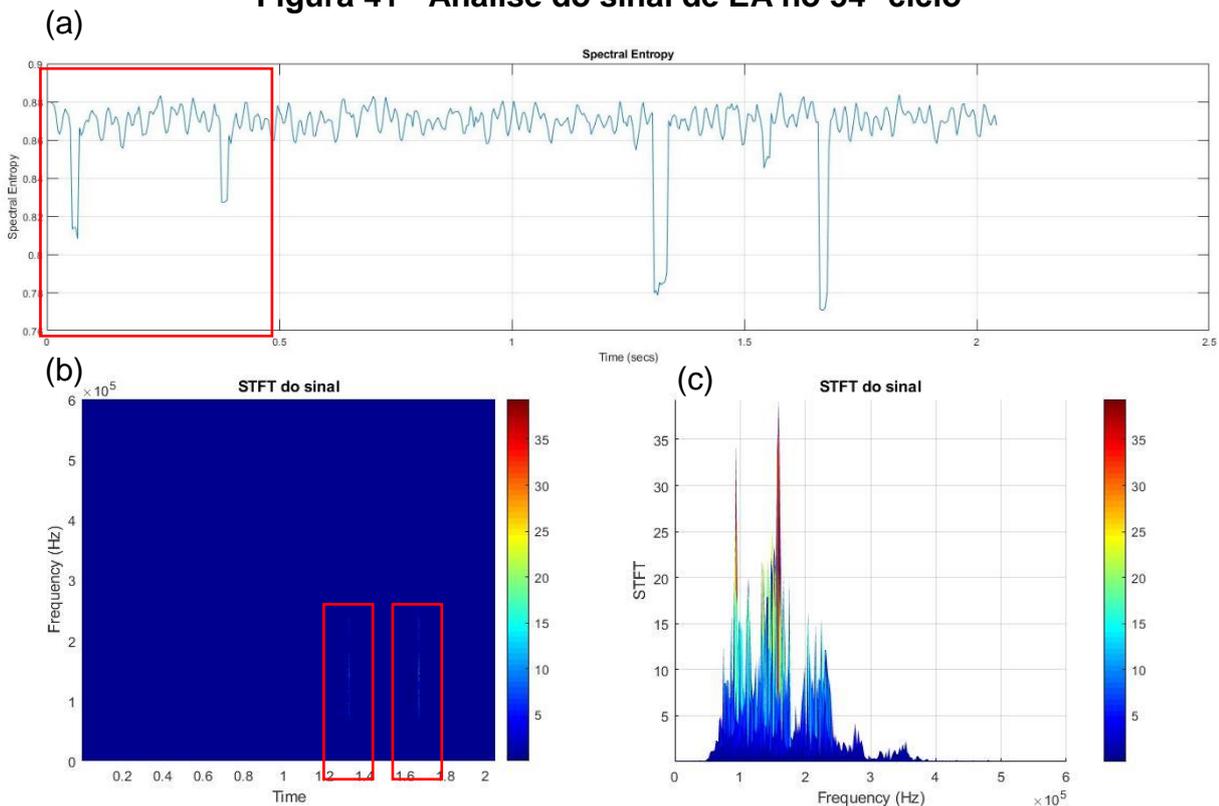
**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

A análise dos dados do 21° ciclo do teste de controle, destacados no Apêndice A– COMPLEMENTO DAS ANÁLISES DA CONDIÇÃO DE CONTROLE

apresentou uma discrepância na EE entre o intervalo de tempo entre 0,6 a 0,8 segundos, condição que quando cruzada com os gráficos reportou uma provável propagação de trinca, com frequências semelhantes as condições previamente destacadas, embora sua intensidade tenha se apresentado mais elevada

Quando se analisa o gráfico da EE do sinal do 54° ciclo do teste de controle, descrito na Figura 41 - Análise do sinal de EA no 54° ciclo nota-se dois picos discrepantes os primeiros 0,5 segundo de coleta, essa discrepância segundo Zhang et al. (2015) apontaria uma provável falha na estrutura em contato, entretanto, a interpretação da STFT indica a um provável falso positivo, confirmado nas partes (b) e (c) e no Apêndice A- COMPLEMENTO DAS ANÁLISES DA CONDIÇÃO DE CONTROLE

**Figura 41 - Análise do sinal de EA no 54° ciclo**

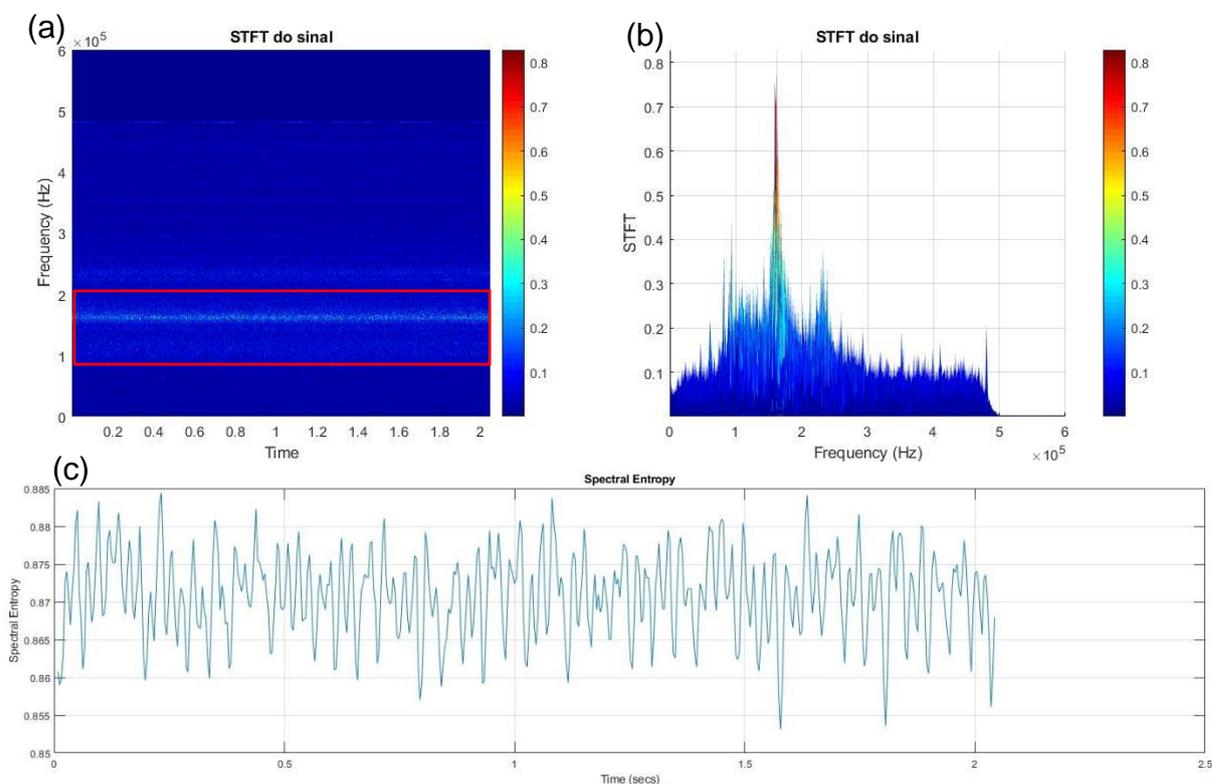


**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Discute-se na Figura 42 as análises gráficas da EA no 56° ciclo de operação, sendo esse o ponto destacado pela análise da energia. Observa-se na STFT deslocada na Figura 42 (a) destaca-se uma concentração de eventos de EA em uma faixa e frequência entre 100 a 200 kHz, o que poderia indicar uma provável leve

aderência e arraste de material. As Figura 42 (b) e Figura 42 (c) não auxiliam na confirmação ou apresentam indícios do provável fenômeno

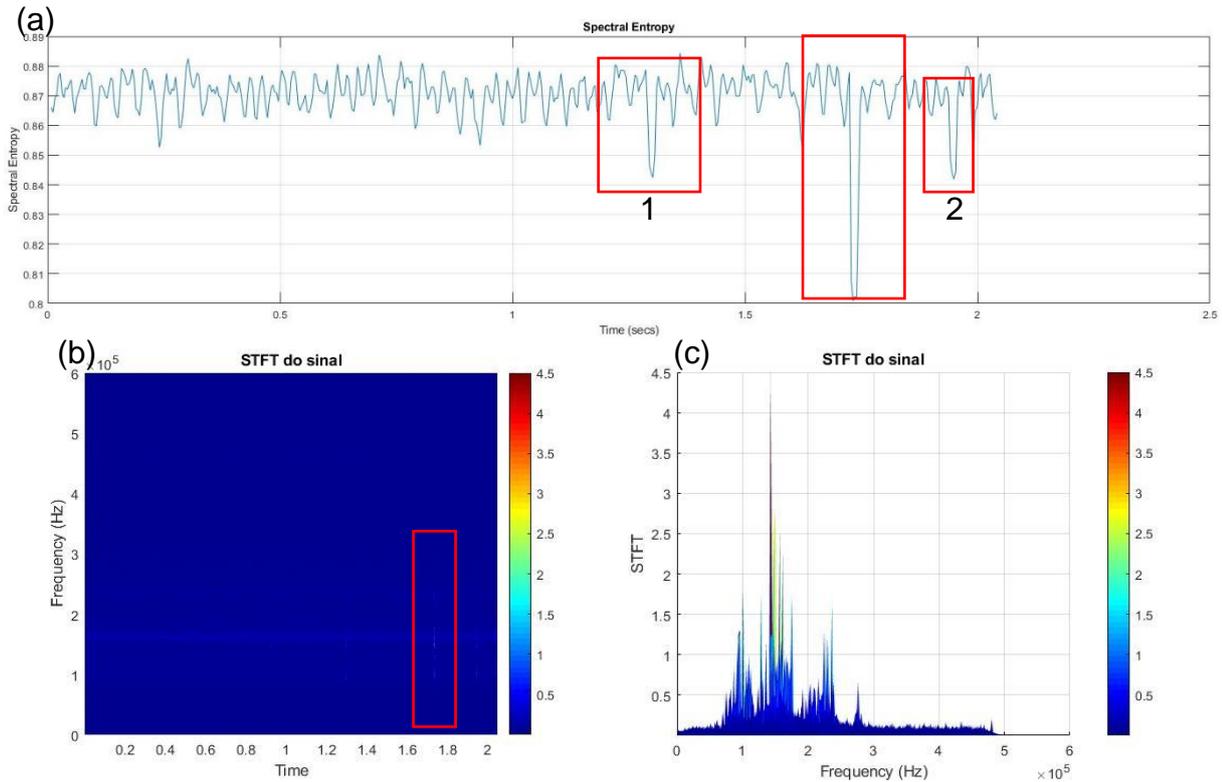
**Figura 42 - Análise do sinal de EA no 56° ciclo**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Conforme previamente discutido, a entropia espectral tende a ser mais sensível a detecção de prováveis falhas ou eventos que propriamente a STFT, a Figura 43 apresenta esta condição no 79° ciclo de operação do conjunto pinhão-cremalheira, uma vez que em Figura 43(c) detectou-se somente um evento de provável falha enquanto em Figura 43(b), demonstrou que os pontos 1 e 2 conforme Zhang et al. (2015) discorre sobre a possibilidade.

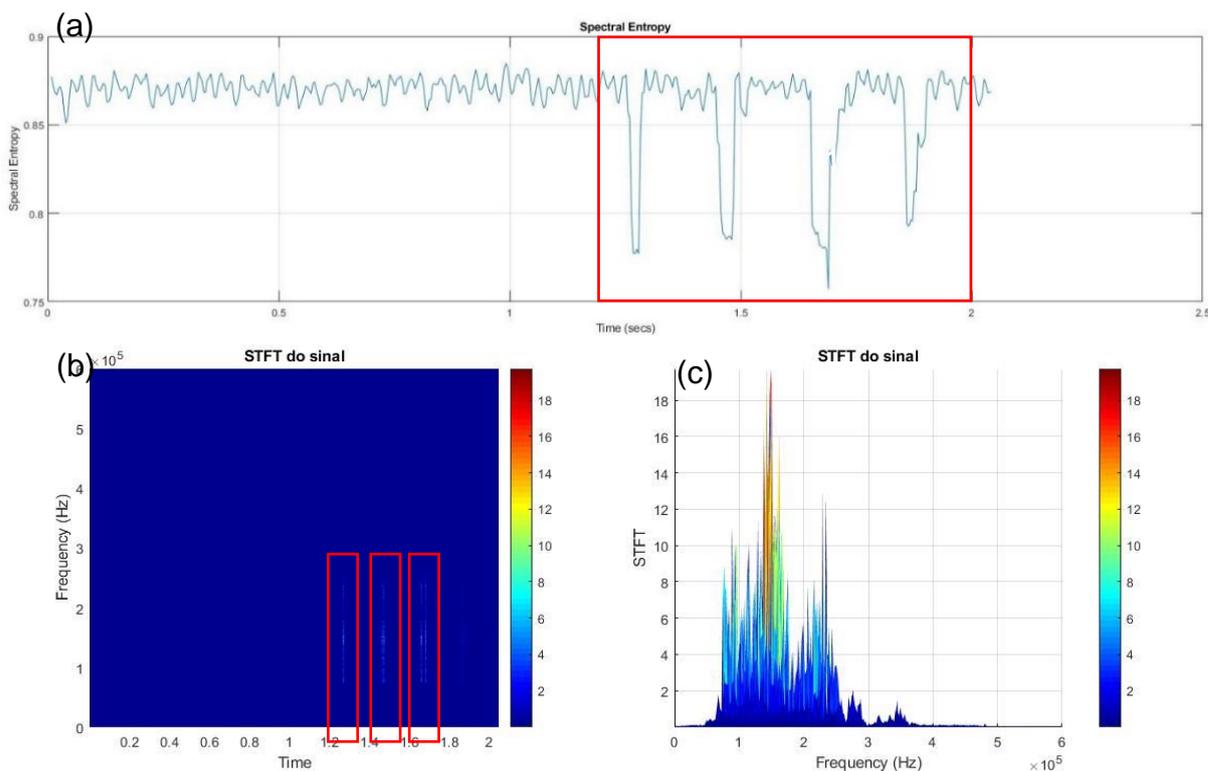
**Figura 43 - Análise do sinal de EA no 79° ciclo**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 44 discute o volume de eventos coletados no sinal de EA no 90° ciclo da condição de controle, com discrepância detectada nas dispersões de Skewness e EE. O volume de eventos demonstrados na Figura 44(a) exhibe novamente pontos de provável falha de acordo com a EE, confirmado nas análises gráficas de STFT. Registra-se que o volume mascarou um dos picos de falha.

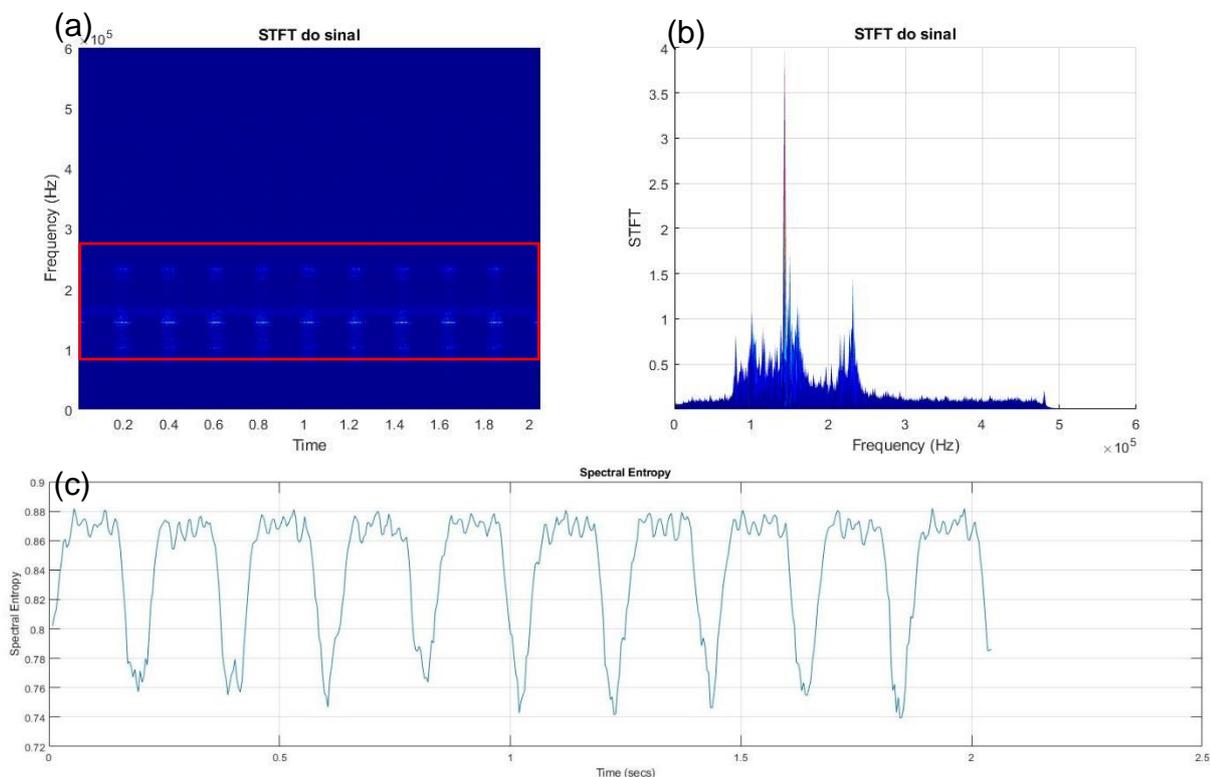
**Figura 44 - Análise do sinal de EA no 90° ciclo**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

As coletas nos 112° e 423° ciclo reportaram a mesma constatação previamente apresentada, com a probabilidade de falha detectadas pela EE corroborada com a análise da STFT. Apresenta-se, na Figura 45, o sinal de EA no 646° ciclo retrata um certo grau de fracionamento entre o contato pinhão cremalheira, tão condição alterou a entropia espectral do sinal, gerando o indicador de falha, tais condições se repetem nos sinais do ciclo 647,648, 650,651,654 identificados no Apêndice A– COMPLEMENTO DAS ANÁLISES DA CONDIÇÃO DE CONTROLE

**Figura 45 – Análise do sinal de EA no 646° ciclo**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

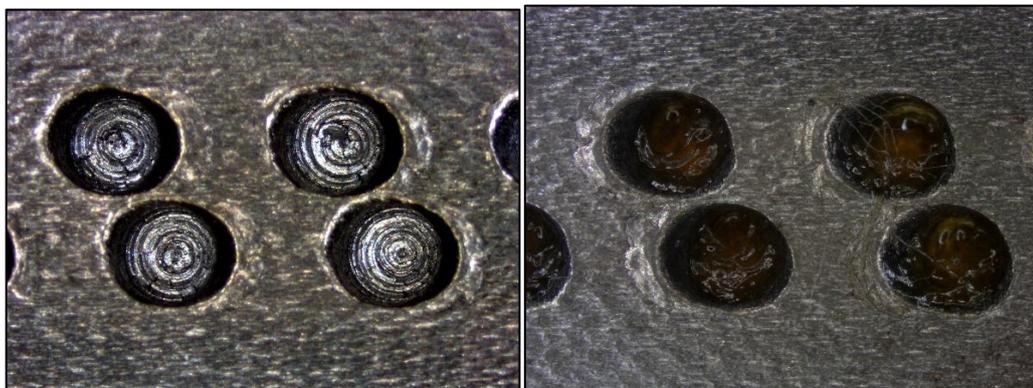
## 4.2. Análise das condições de desgaste induzido

A composição da análise dos sinais de EA nas condições de desgaste induzido dividem-se nos 4, conforme a evolução das imperfeições induzidas.

### 4.2.1. Condição de desgaste induzido 01

Adotando a metodologia previamente apresentada, os testes foram efetuados não resultando em mudanças significativas na superfície de contato com a condição de desgaste 01. A Figura 46 apresenta a condição superficial no dente de análise da cremalheira, em (a) observa-se o estado inicial e em (b) a condição pós teste. Não se observou deformações e trincas significativas na região de análise.

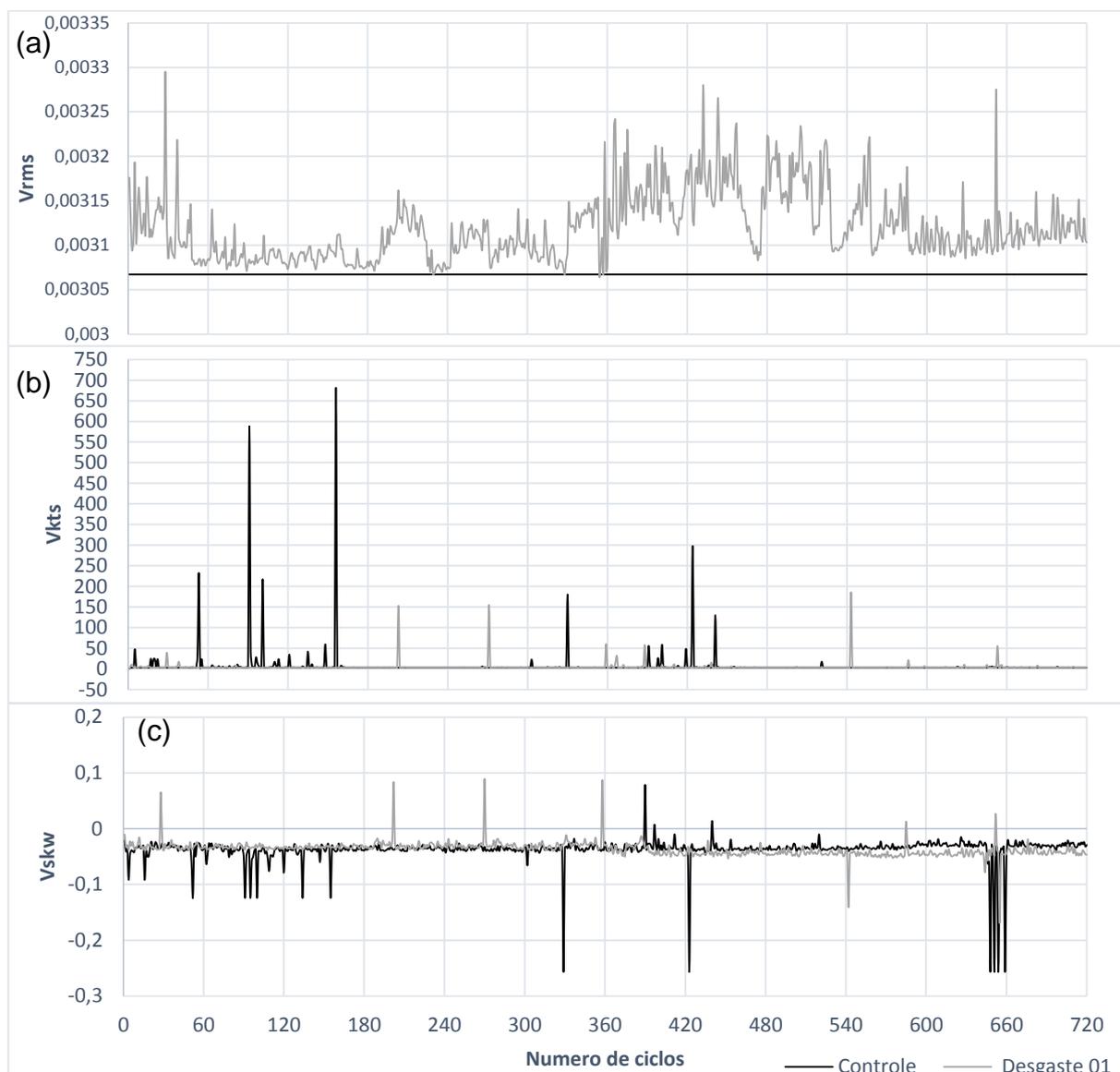
**Figura 46 - Condição da superfície nos testes de desgaste 01**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

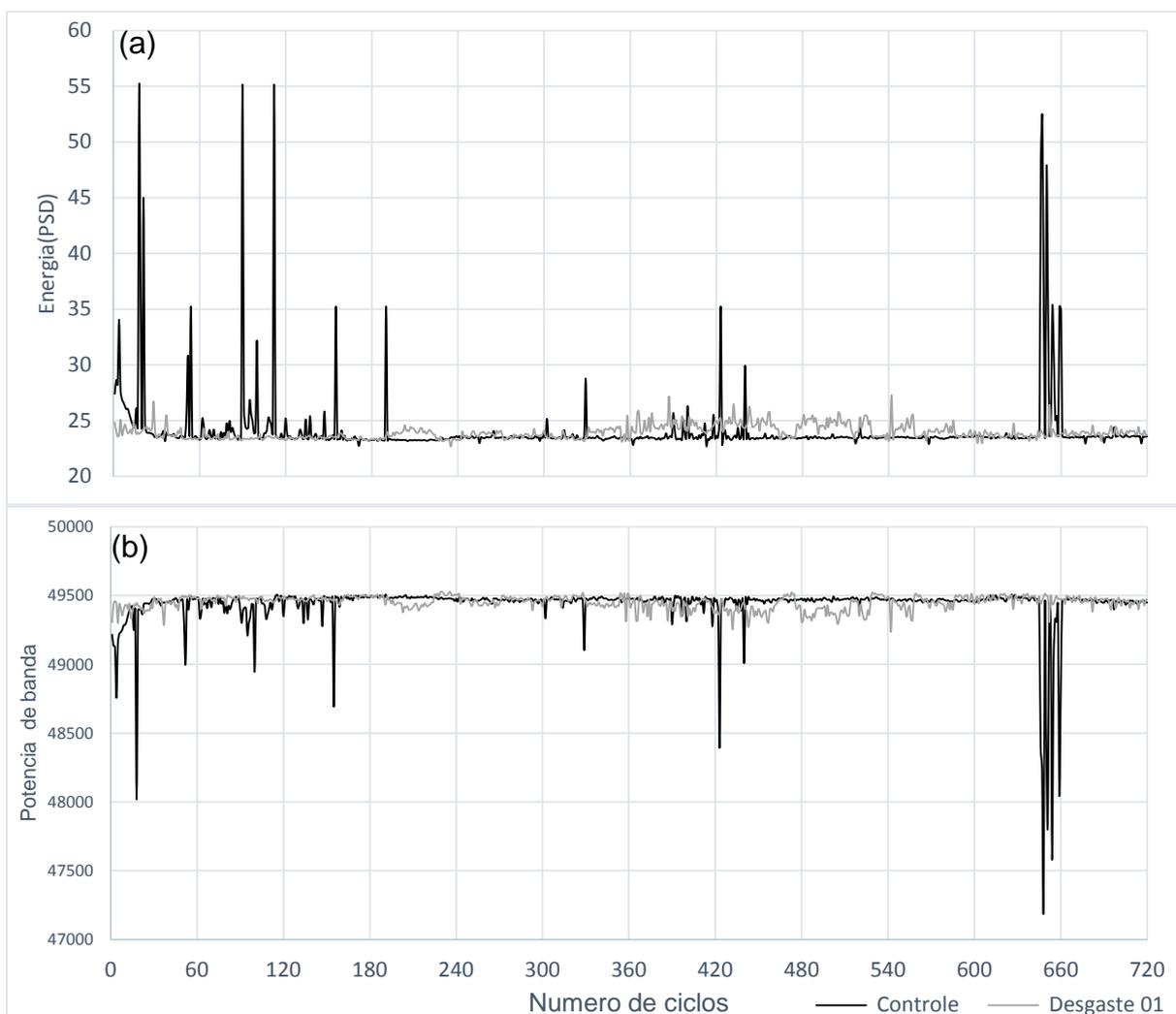
Considerando a disposição dos dados estatísticos, a Figura 47 apresenta a dispersão do RMS, Curtoses e Skewness para a condição 01 de desgaste induzido. Considerando a análise por RMS, apresentada na Figura 47(a), nota-se um afastamento da dispersão, embora não constante, esta condição entre em consonância as proposições de Sharma et al. (2017b) quanto a mudança do sinal quando se altera a superfície e de Tan et al. (2007) quanto ao aumento do sinal em relação a evolução da falha, entretanto a inconstância da dispersão dificulta uma conclusão mais assertiva. As dispersões dos cálculos de Curtoses e Skewness não se mostraram conclusivas, contradizendo o proposto por Jemielniak; Otman (1998).

**Figura 47 – Dispersão dos dados estatísticos do sinal de desgaste 01**



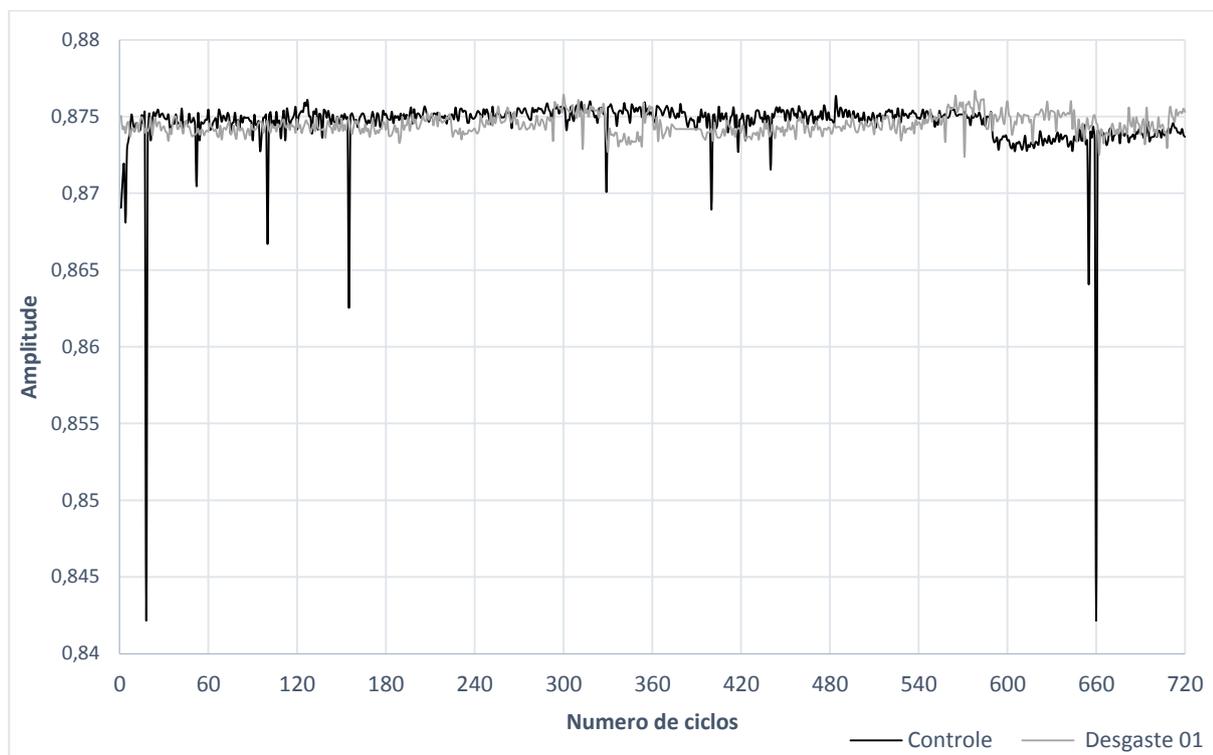
**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Destaca-se na Figura 48 as técnicas de análise do sinal por PSD e potencia de banda, ambas associadas a potência resultante do sinal. Considerando o perfil dos testes de controle, ambas as técnicas não apresentaram divergências significativas o que dificulta uma análise conclusiva.

**Figura 48 – Dispersão da análises de potencia do sinal de desgaste 01**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 49 exibe a dispersão da Entropia Espectral (EE) nos 720 ciclos de operação, a condição de desgaste pode ser considerada como próxima da estabelecida como controle, dessa forma, a EE oscila pouco acima da condição inicial nos últimos ciclos de operação.

**Figura 49 – Dispersão da Entropia Espectral do sinal de desgaste 01**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Tabela 2 apresenta os pontos de análise do sinal considerados como discrepantes após estabelecidos os critérios de seleção.

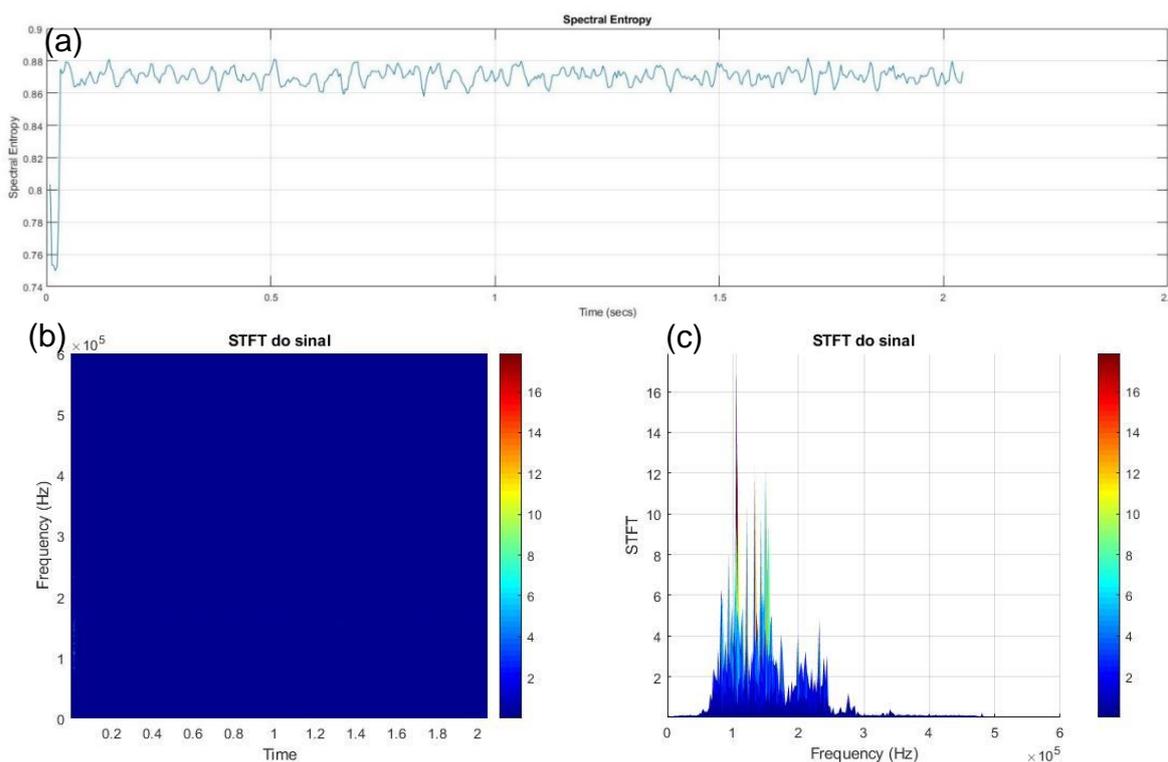
**Tabela 2 - Pontos de análise no teste de desgaste 01**

Defeito 01	RMS	2,202,270,362,371,387,400,542,644,655
	Kurtoses	2,362,371,400,644,655
	Skewness	362,371,400
	PSD	2,202,270,362,371,387,400,644,646,655
	Energia	2,28,202,270,362,371,387,400,644,646,655
	Entropia espectral	2,28,202,243,270,331,362,371,380,385,387,391,400,453,514,542,644,646,655

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

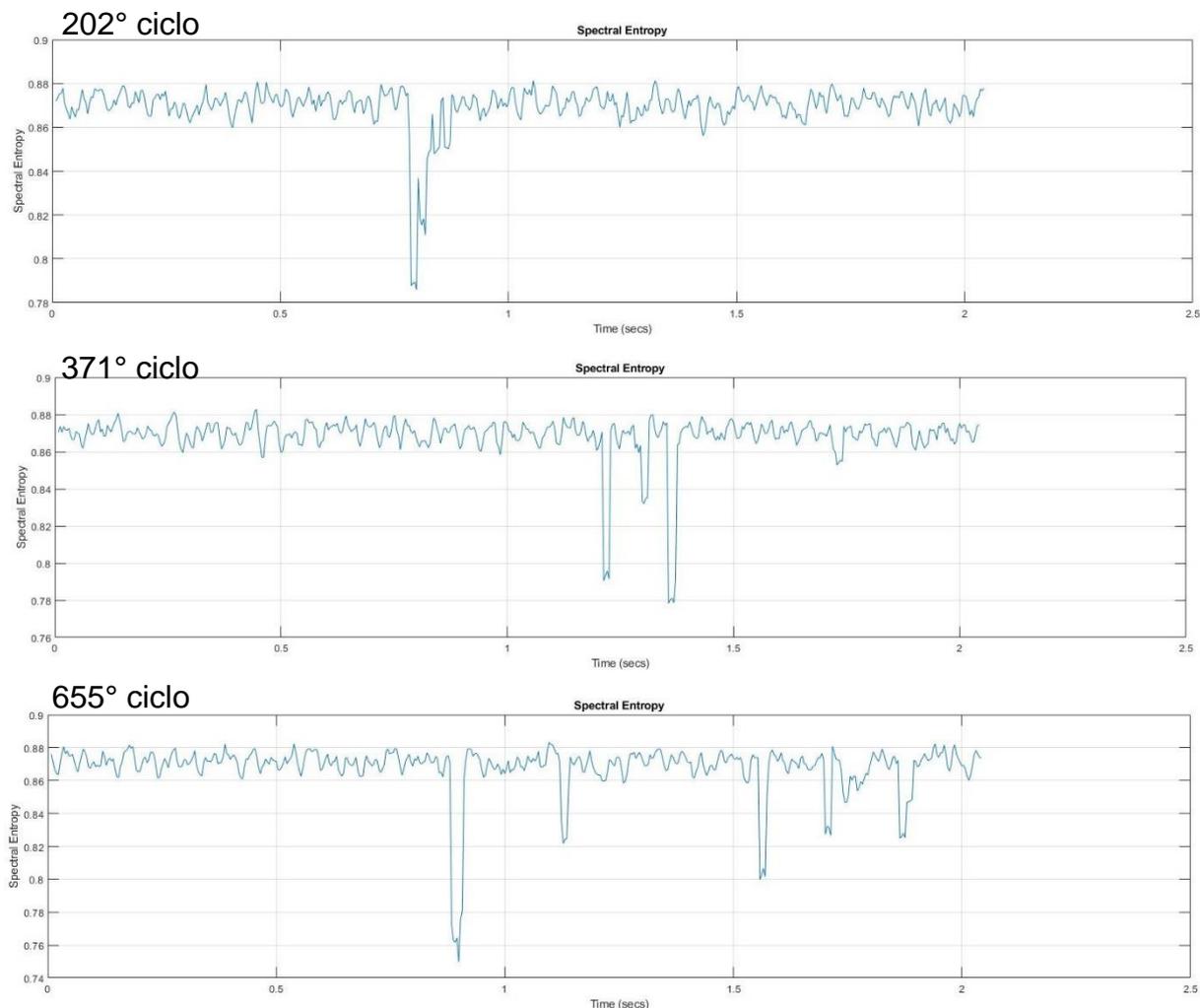
A Figura 50 apresenta o sinal de EA no 2º ciclo de operação do conjunto, nota-se que o sinal, de acordo com as ponderações sobre a EE, que na região entre o início da coleta a 0,2 segundos ouve uma queda significativa do sinal. A inferência da provável razão e vista na STFT do sinal, em quem ,de acordo com Hase et al. (2012), registrou-se uma provável trinca na região.

**Figura 50 – Análise do sinal no ponto 02**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

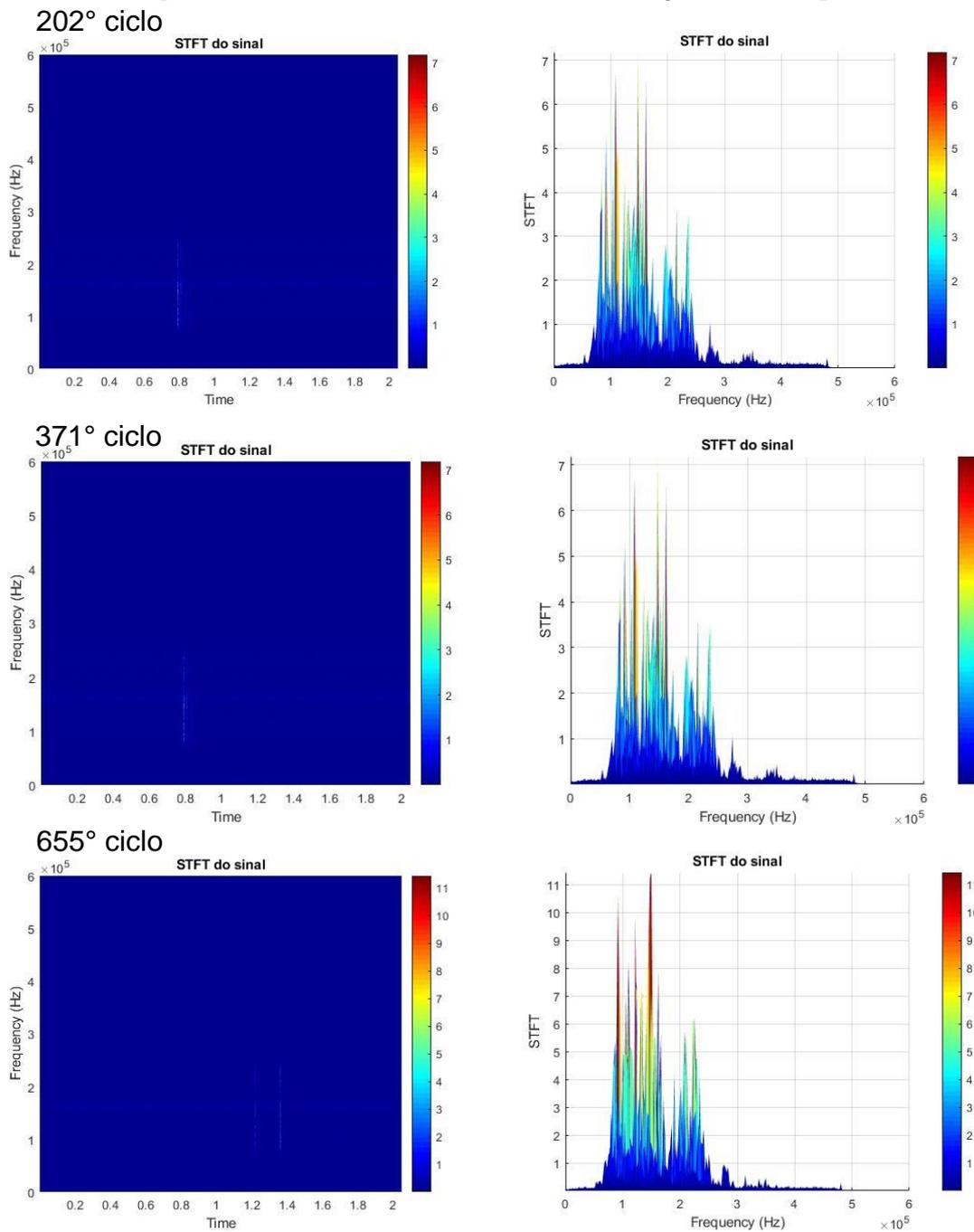
Registra-se então uma repetição desta condição entre os sinais considerados com foco de análise nos ciclos sinais 202, 270, 331,362, 371, 385, 387, 453, 542, 644 e 655. A ponderação de repetibilidade vem da interpretação dos gráficos de EE, conforme exibido na Figura 51 – Análise das Entropias Espectrais da condição de Desgaste 01 em que se apresentam os ciclos 202,371 e 655. Segundo os critérios de interpretação estabelecidos previamente, baseados na interpretação de Chai et al. (2018) e Zhang et al. (2015), a EE reportou um distorção associada a falha.

**Figura 51 – Análise das Entropias Espectrais da condição de Desgaste 01**

**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

A interpretação da falha resultante vem da análise em conjunto com a STFT, apresentada na Figura 52 com o sinal exposto na forma de tempo-frequência-amplitude, segundo o mapeamento adotado a excitação entre as frequências de 80 a 250 kHz indicam uma provável trinca nos ponto, esta condição foi reportada nos ciclos analisados na Figura 51 – Análise das Entropias Espectrais da condição de Desgaste 01 além dos ciclos 270, 331,362, 385, 387, 453, 542 e 644 , que apresentam sua análise gráfica no Apêndice B – COMPLEMENTO DAS ANÁLISES DA CONDIÇÃO DE DEFEITO 01

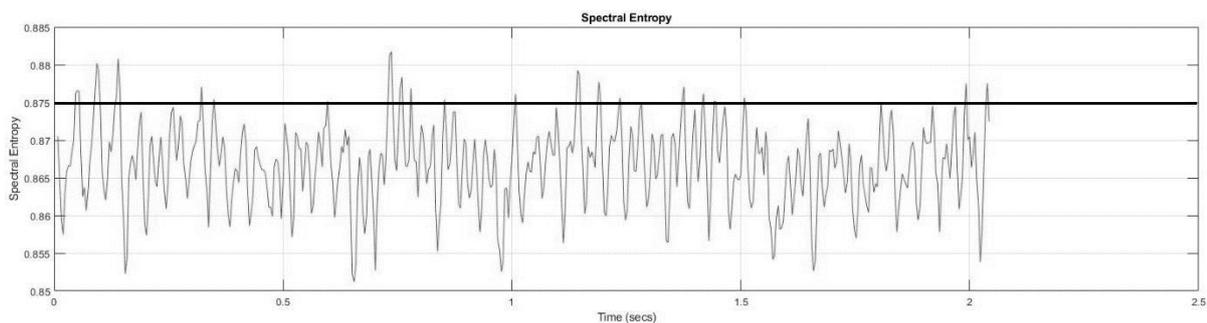
**Figura 52 – Análise das STFT da condição de Desgaste 01**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Alguns dos sinais analisados apresentaram divergência pelos critérios de análise por estarem com os valores de entropia abaixo da média da dispersão. Este feito, causado por uma leve alteração nos mecanismos, mas ainda semelhantes a condição padrão. Este falso positivo ocorreu nos ciclos 242, 380, 391, 400 e 514.

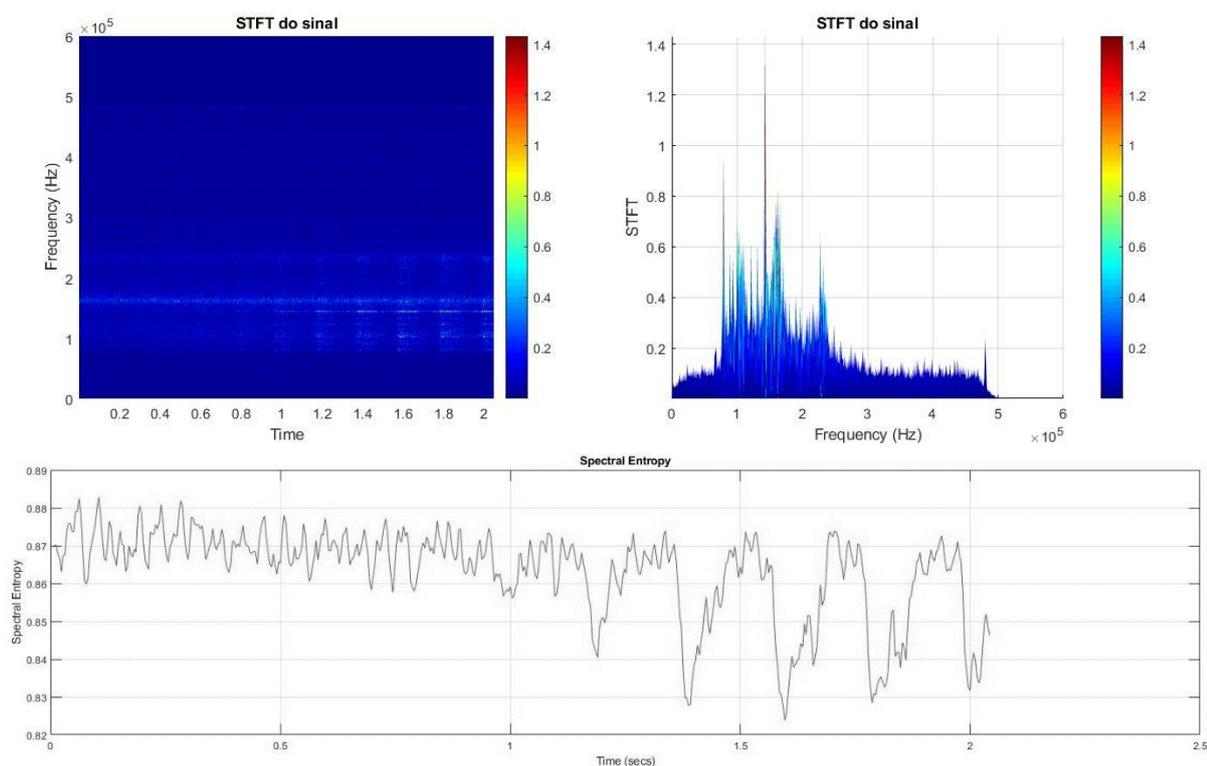
**Figura 53 – Análise do sinal no ponto 243**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Regista-se ainda, na Figura 54 , um leve fracionamento no contato entre pinhão cremalheira gerando oscilações no sinal, criando assim um indicador de falha nos critérios adotados.

**Figura 54 – Análise do sinal no ponto 646**



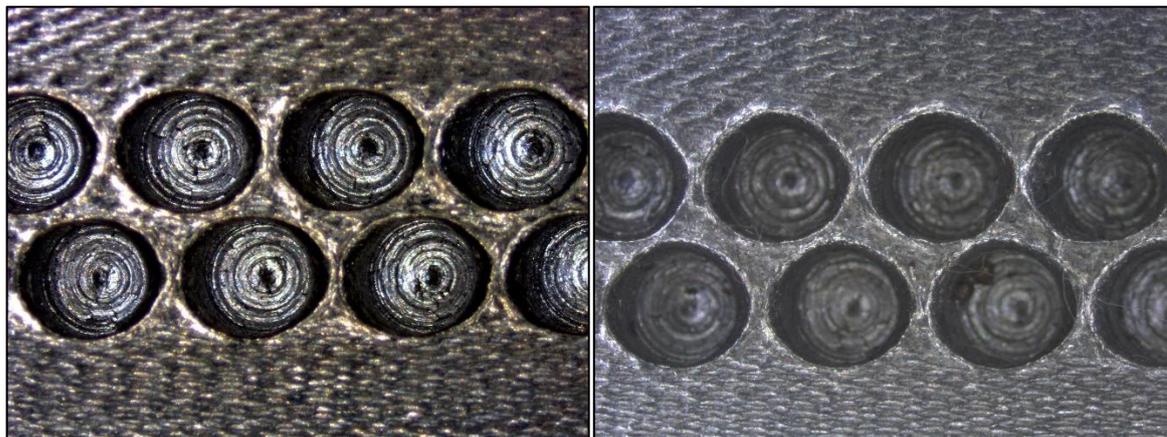
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

#### 4.2.2. Condição de desgaste induzido 02

Adotando a metodologia previamente apresentada, os testes foram efetuados não resultando em mudanças significativas na superfície de contato com a condição

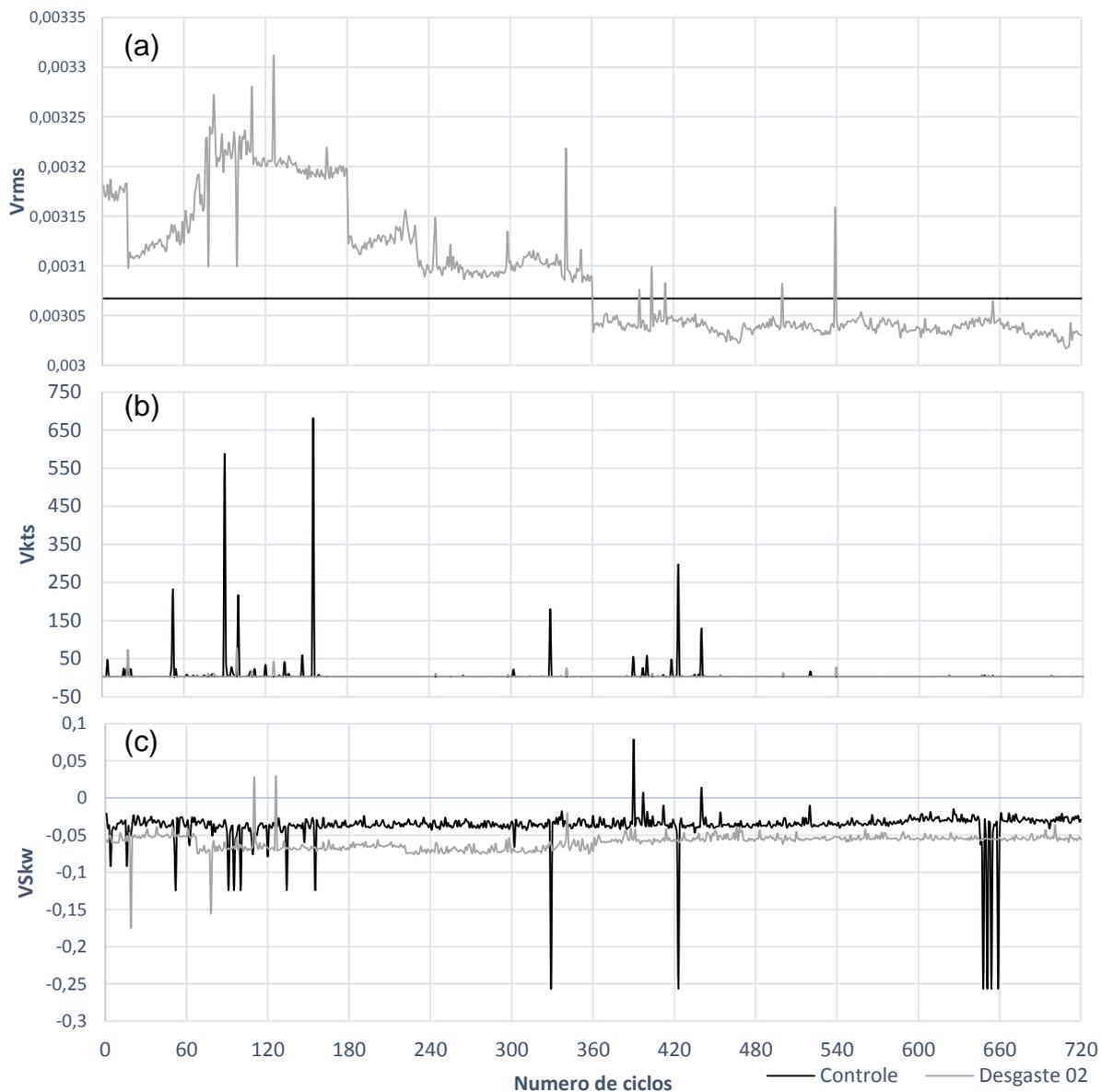
de desgaste 02. A Figura 55 apresenta a condição superficial no dente de análise da cremalheira, em (a) observa-se o estado inicial e em (b) a condição pós teste. Não se observou deformações e trincas significativas na região de análise.

**Figura 55 - Condição da superfície nos testes de desgaste 02**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

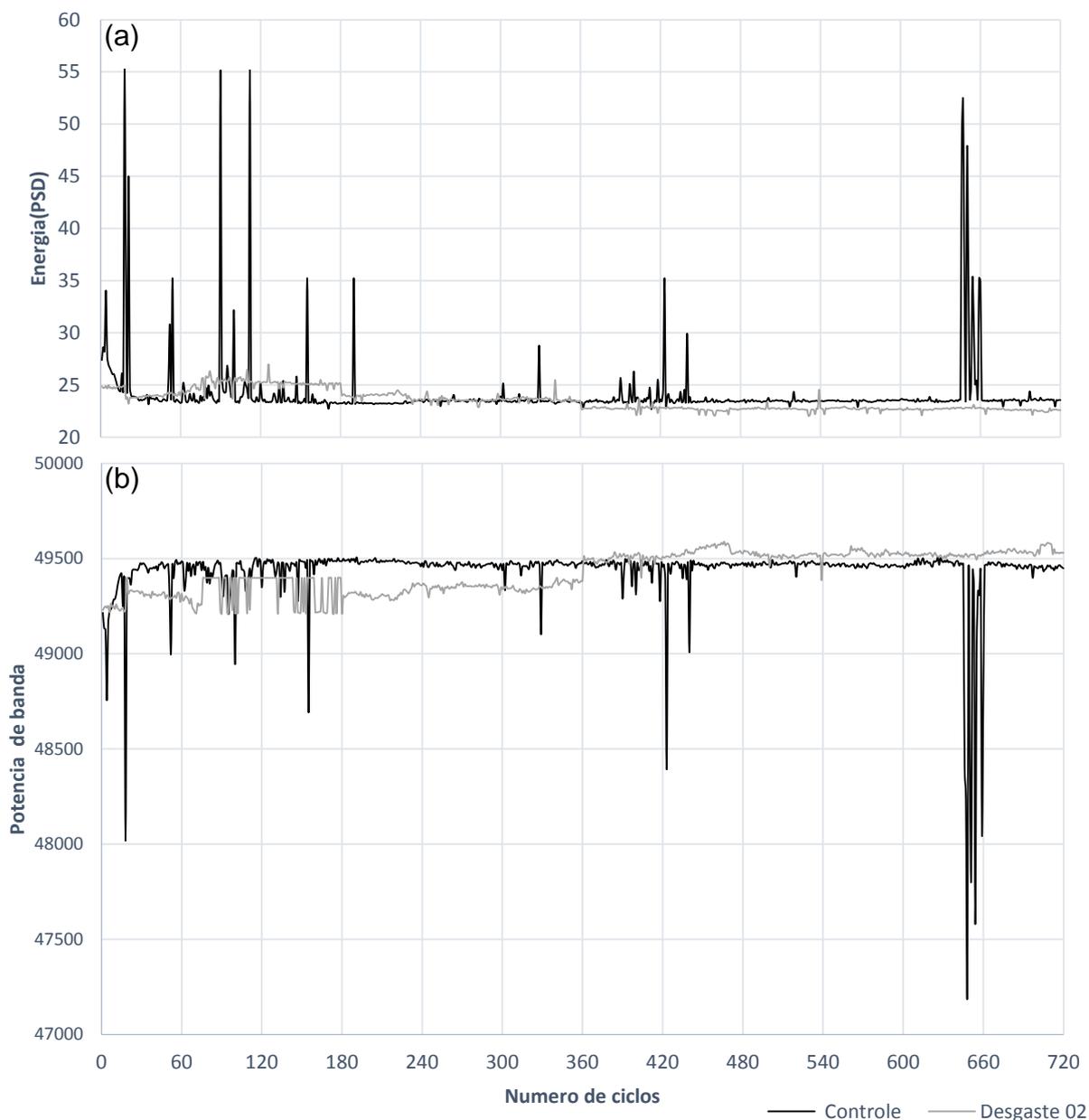
Apresenta-se na figura Figura 56 a dispersão dos dados estatísticos dos sinais de EA. Observa-se na condição de tratamento do sinal pelo RMS, vista na Figura 56(a), que os dados não se mantiveram coesos durante os testes, parte disso pode ser justificada pela interrupção dos testes para lubrificação, o que pode ter alterado as condições previamente existentes de contato, entretanto, a dispersão manteve-se divergente da condição de controle. Destacada na Figura 56(b), a dispersão dos dados pela Curtoses não apresentou a resposta esperada quando a capacidade de diagnóstico, mantendo-se quase homogeneia aos dados de controle. Destaca-se na Figura 56(c), a dispersão dos dados quanto a Skewness, os valores negativos constantes indicam um afastamento dos dados em relação a media e o modo, quando compara-se com a condição de controle, acredita-se que os eventos resultantes tenderam a modificar o sinal.

**Figura 56 – Dispersão dos dados estatísticos do sinal de desgaste 02**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

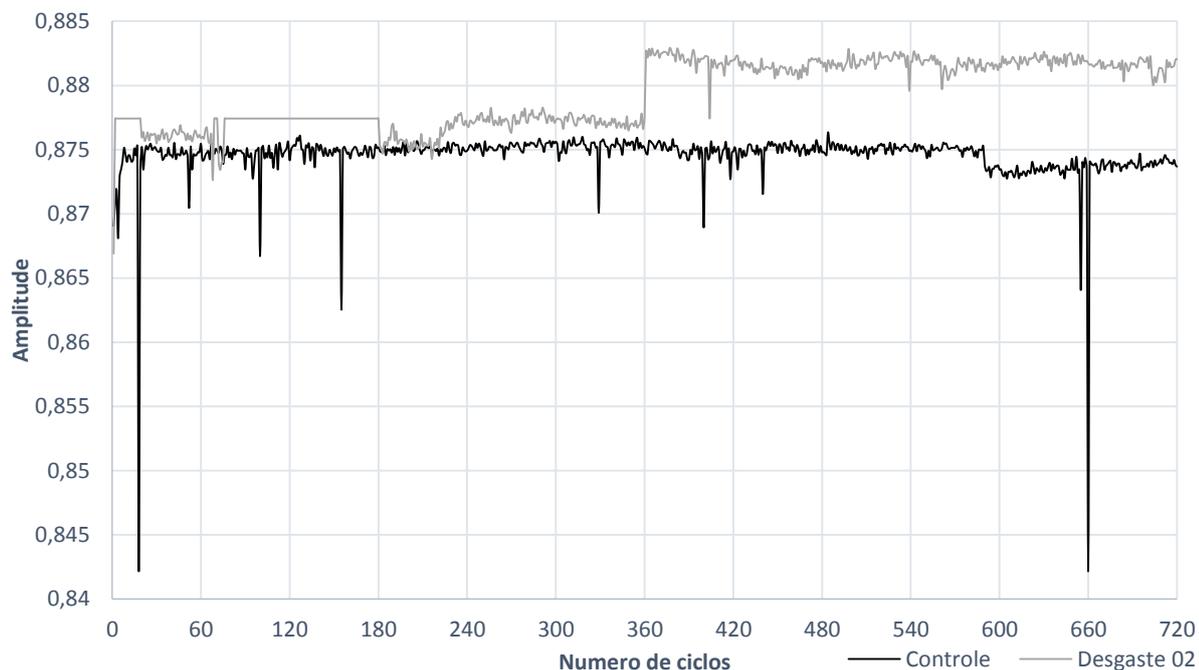
Discute-se na Figura 57 as dispersões dos dados associados a PSD dos dados, visualizada na Figura 57(a), e da energia do sinal, exibida em Figura 57(b). observa-se no conjunto dos dados variação semelhante a dispersão do RMS, no que diz respeito a mudança de patamar após a lubrificação do conjunto, a variação pode ser constatada na PSD após o 360° ciclo, em que o sinal altera seu patamar, e na análise da energia pelo seu aumento repentino após o mesmo número de ciclos

**Figura 57 – Dispersão dos dados energia associada ao sinal de desgaste 02**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

A Figura 58 discorre sobre a disposição dos dados de Entropia Espectral, conforme registrado previamente, a decorrência da lubrificação gerou uma variação em forma de degrau após a parada para lubrificação do conjunto. Observa-se na análise dos dados que se formaram 2 patamares entre o 8° ao 19° ciclo e entre 76° e o 177° ciclo, amos resultantes da metodologia de detecção de discrepâncias adotada.

**Figura 58 – Dispersão da entropia Espectral do sinal de desgaste 02**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Um ponto fundamental das técnicas adotada no processamento de sinais está na sensibilidade a pequenas variações, embora a lubrificação tenha sido um ponto em comum entre todos os testes, somente esta condição revelou tal variação evidente. Considerando os pontos de ajuste para uma análise mais detalhada sobre os motivos para a grande variação na técnica adotada apresenta-se a Tabela 3 referente aos dados do teste de desgaste 02.

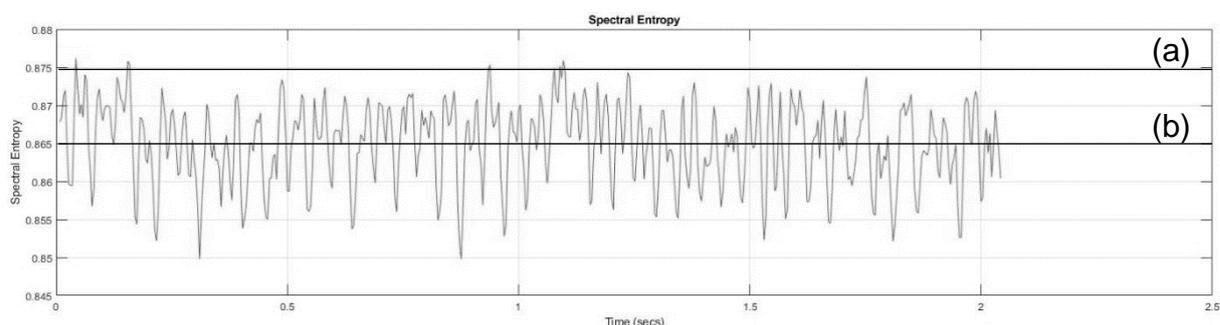
**Tabela 3 - Pontos de análise no teste de desgaste 02**

Defeito 02	RMS	19,78
	Kurtoses	78,404
	Skewness	99,404
	PSD	19,78,99,404
	Energia	19,76,80,91,101,107,124,135,142,157,165, 177,341,404
	Entropia espectral	2,8,19,76,80,91,101,107,124,135,142,157, 165,177,341,404,497,514,542,586,644,646, 655

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

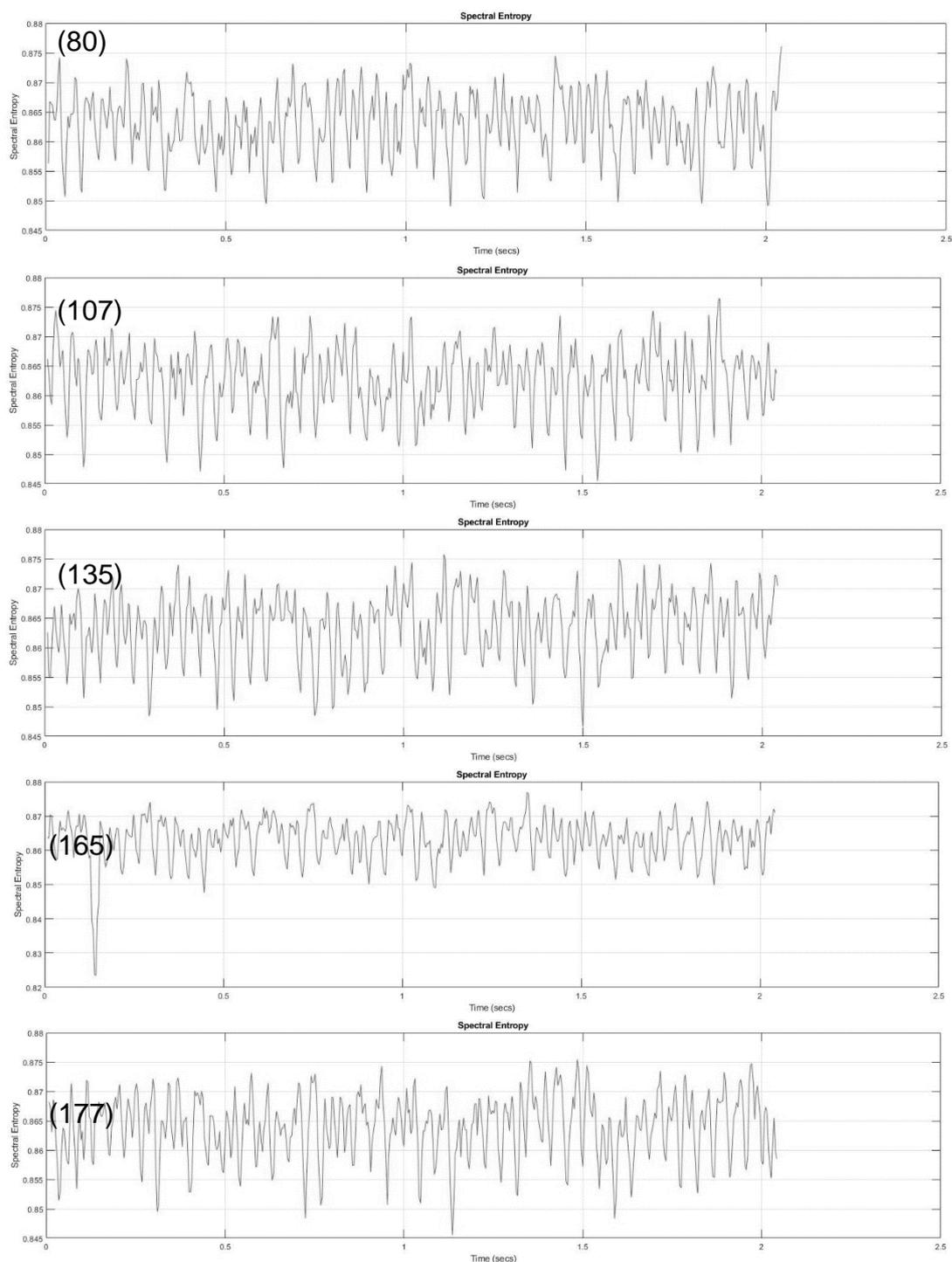
Analisando o sinal de EA resultante do 2º ciclo de operação, representado na Figura 59 quanto a Entropia Espectral calculada no sinal. Observa-se que a discrepância do entre a media da dispersão do sinal, representada na reta (b), apresentou um grande desvio quando compara a média das entropias exibida em (b), tal condição se repete entre o 8º ao 19º ciclos, com um indicativo de falha, esta não visível, no último ciclo do intervalo

**Figura 59 - Análise do sinal de EA no 2º ciclo**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

A janela de dados entre o 76º ao 177º ciclos registrou-se um elevado número de sinais em que houve discrepância entre os dados e os parâmetros adotados para análise criando um patamar no gráfico igual a média dos dados. A Figura 60 reporta alguns gráficos de entropia espectral entre os ciclos analisados, a maior parte dos ciclos destacados apresentou um comportamento considerado como padrão, entretanto, conforme já especificado, os valores estatísticos calculados tomaram os ciclos discrepantes.

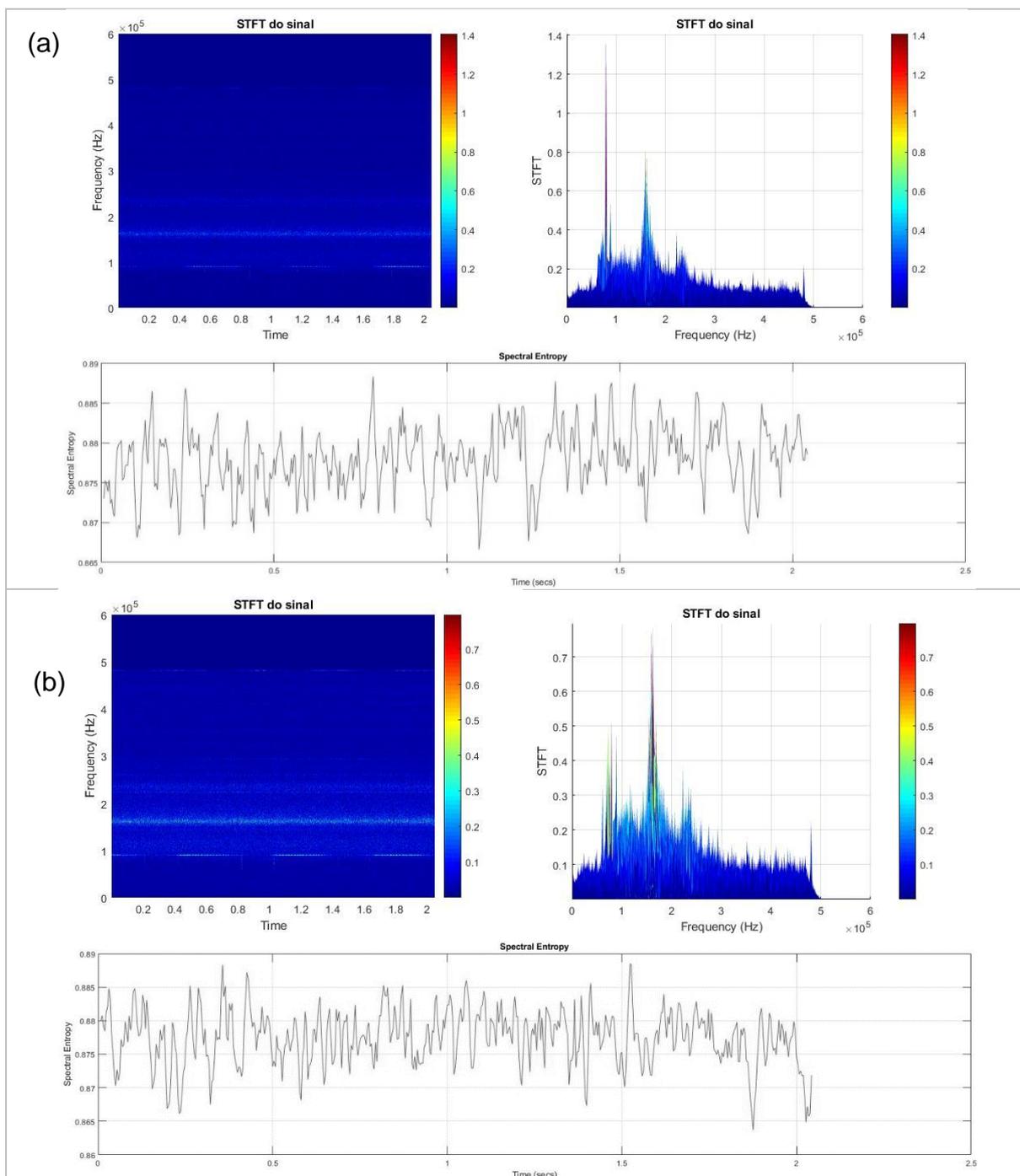
**Figura 60 - Análise do sinal de EA entre o 76° ao 177° ciclo**

**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

A Figura 61 caracteriza o sinal de EA dos pontos divergentes entre o 404 a 655° ciclo de operação. Nota-se uma estrutura semelhante nos sinais destacados, com mecanismos de desgaste também semelhantes, porém em intensidades diferentes. A Figura 61(a) expõem o sinal de EA no 404° ciclo e 655° ciclo na Figura

61(b), em ambos nota-se os certa aderência, pelas frequências excitadas entre 80 a 200 khz, entretanto, a discrepância vem da mudança de patamares pela mudança das condições propostas na metodologia.

**Figura 61 - Análise do sinal de EA entre o 404° ao 655° ciclo**

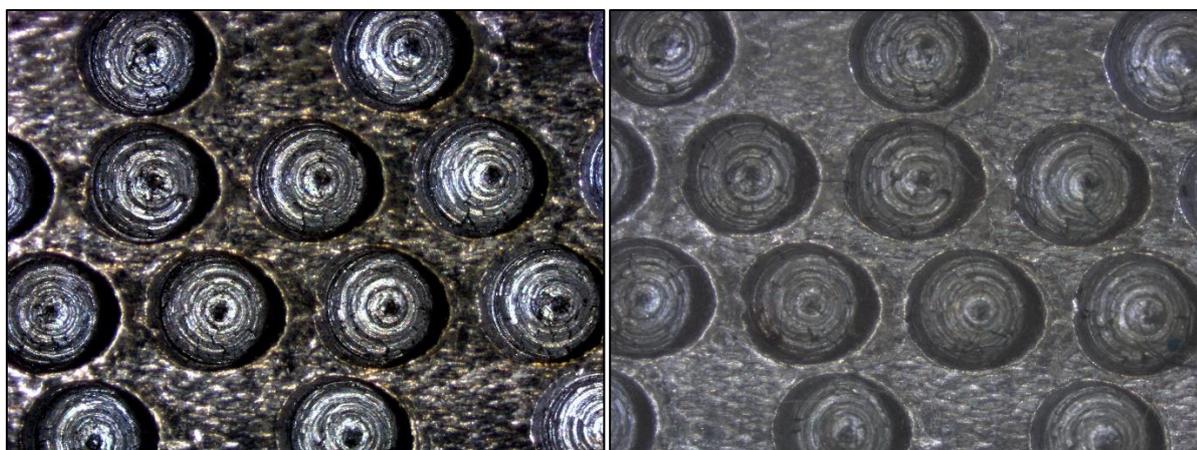


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

### 4.2.3. Condição de desgaste induzido 03

Adotando a metodologia previamente apresentada, os testes foram efetuados não resultando em mudanças significativas na superfície de contato com a condição de desgaste 03. A Figura 62 apresenta a condição superficial no dente de análise da cremalheira, em (a) observa-se o estado inicial e em (b) a condição pós teste. Não se observou deformações e trincas significativas na região de análise.

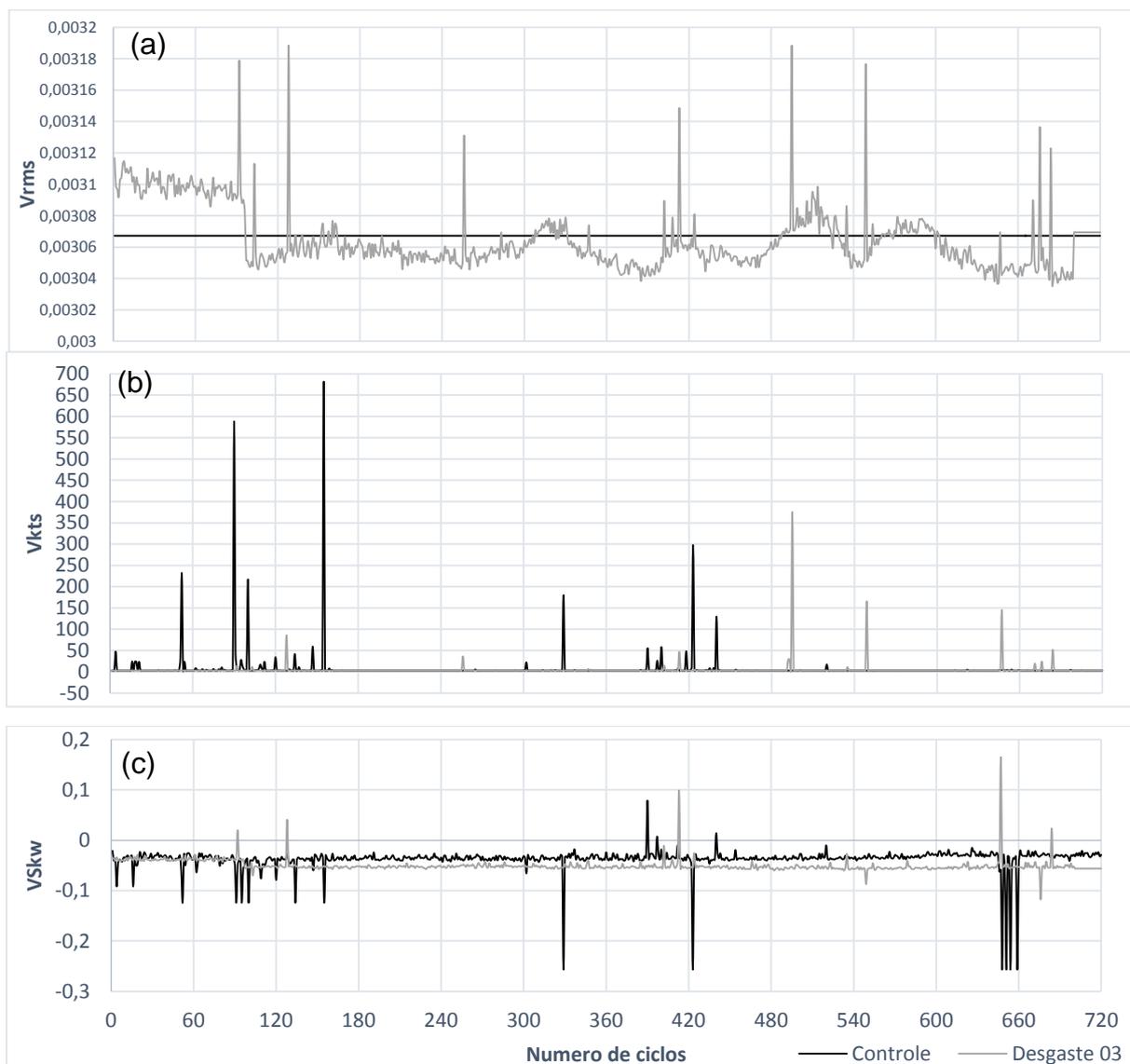
**Figura 62 - Condição da superfície nos testes de desgaste 03**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

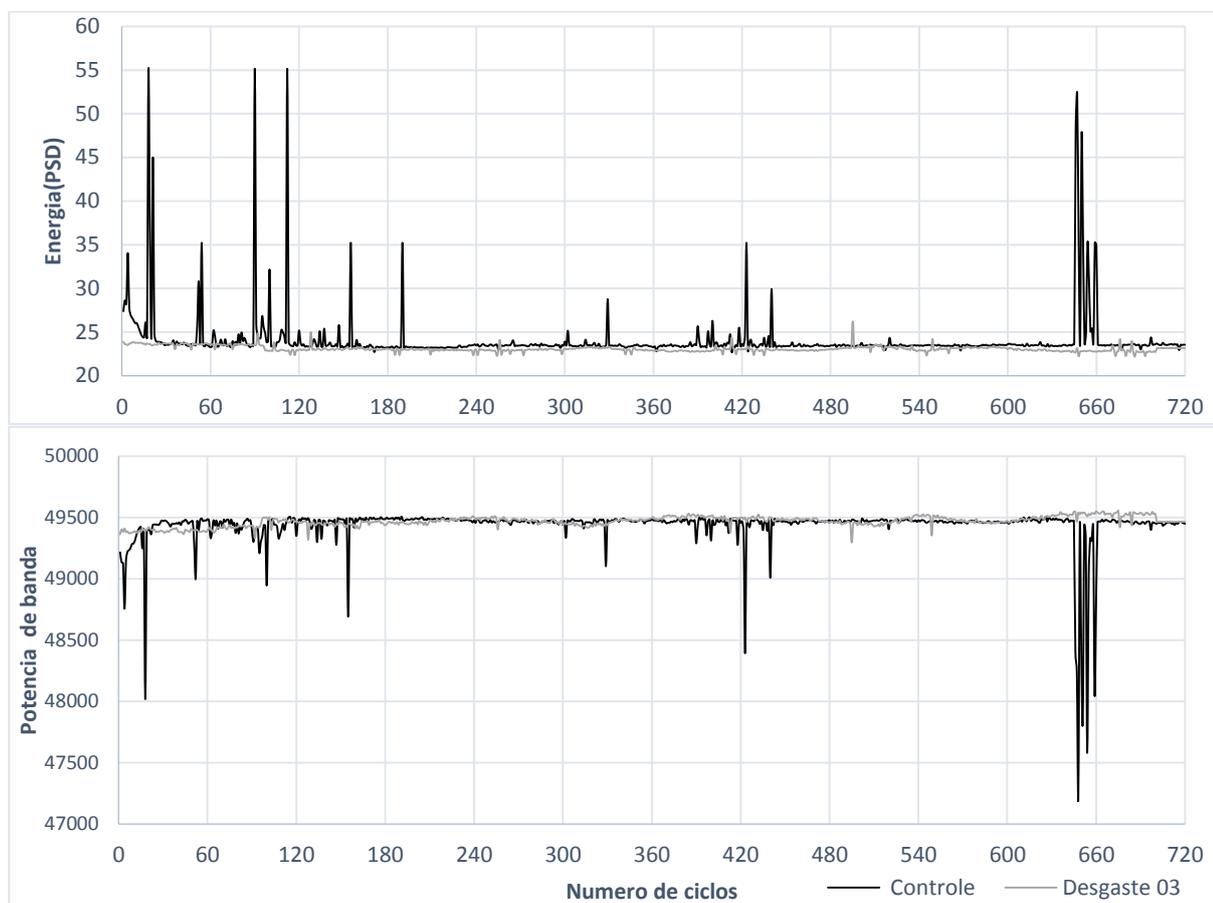
A dispersão dos dados estatísticos, apresentada na Figura 63, contém os dados de RMS, Curtoses e Skewness dos sinais da condição de desgaste 03. Regista-se que a RMS, reportada em Figura 63(a), apresentou uma oscilação entre a média dos valores da condição de controle entre os últimos  $\frac{3}{4}$  da operação da condição. As dispersões de Curtoses e Skewness não reportaram variações significativas com a condição de controle.

**Figura 63 – Dispersão dos dados estatísticos do sinal de desgaste 03**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

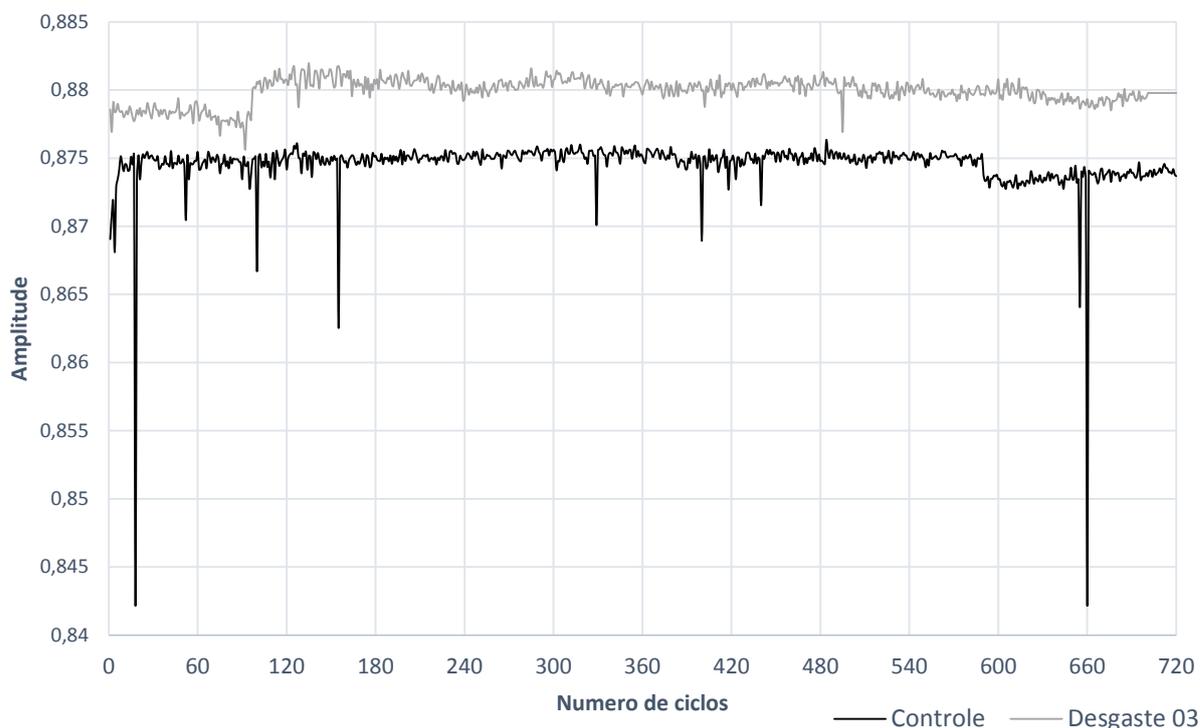
As técnicas de processamento baseadas na energia inerente ao sinal de EA são exibidas na Figura 64 em quem observa-se os dados de PSD e energia de banda. A dispersão dos dados de PSD, Figura 64, apresentam pela primeira vez nos testes algum sinal de alteração em relação a condição de controle, enquanto a dispersão dos dados de energia não demonstrara variação significativa.

**Figura 64 – Dispersão dos dados energia associada ao sinal de desgaste 03**

**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

A dispersão dos dados de EE, apresentada na Figura 65, desmonta o afastamento dos valores de EE da condição de desgaste 03 em relação a condição de controle. Este afastamento é resultante do provável aumento do número de fenômenos devido a redução da área efetiva de contato e pelo aumento do número de falhas induzidas.

**Figura 65 – Dispersão da entropia Espectral do sinal de desgaste 03**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Tabela 4 demonstra os pontos considerados como discrepantes pelos critérios estabelecidos. Destaca-se o menor número de pontos em relação aos ensaios previamente realizados e sua repetição entre as técnicas adotadas.

**Tabela 4 - Pontos de análise no teste de desgaste 03**

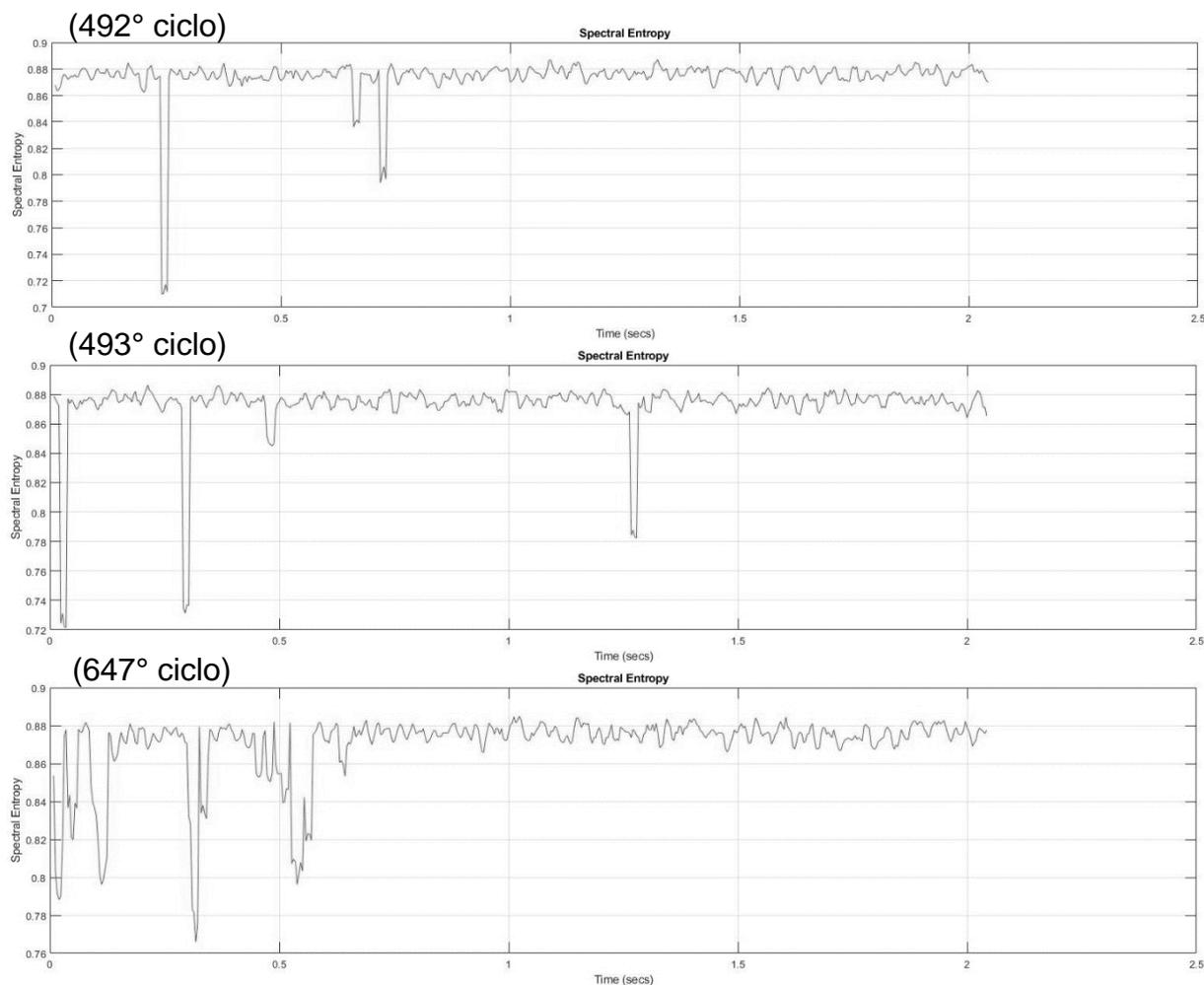
Defeito 03	RMS	492,493,647
	Kurtoses	492,493
	Skewness	492,493
	PSD	492,493,647
	Energia	492,493,647
	Entropia espectral	492,493,647

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Analisando as EE dos três sinais selecionados, demonstrados na Figura 66, nota-se uma provável ocorrência de falha nos pontos em que o valor calculado

sofreu uma queda, a condição de trinca é confirmada quando se analisa as STFTs dos 3 sinais.

**Figura 66 - Análise dos sinais de EA na condição de desgaste 03**

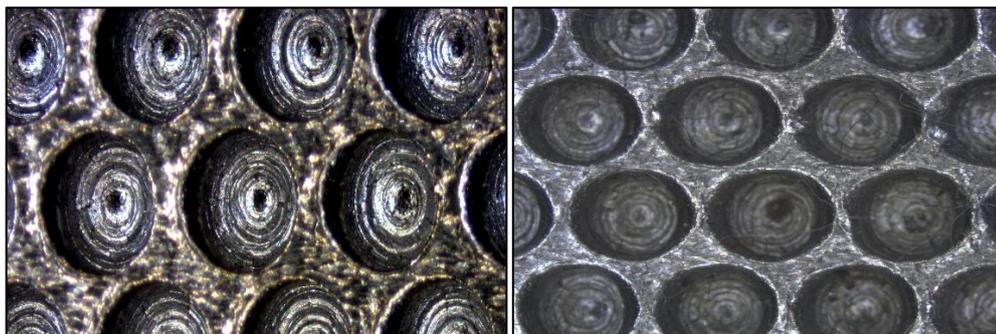


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

#### 4.2.4. Condição de desgaste induzido 04

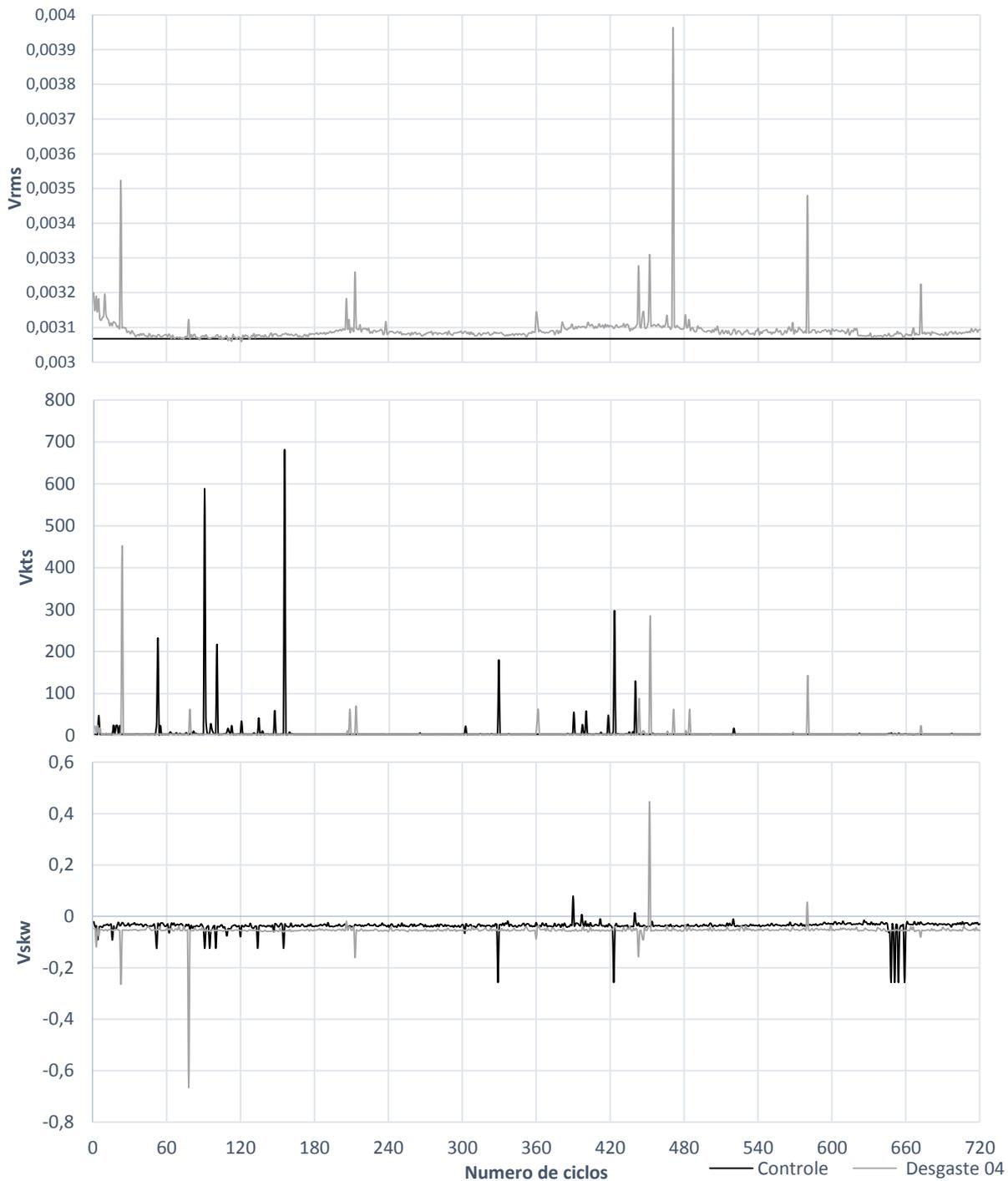
Adotando a metodologia previamente apresentada, os testes foram efetuados não resultando em mudanças significativas na superfície de contato com a condição de desgaste 04. A Figura 67 apresenta a condição superficial no dente de análise da cremalheira, em (a) observa-se o estado inicial e em (b) a condição pós teste. Não se observou deformações e trincas significativas na região de análise.

**Figura 67 - Condição da superfície nos testes de desgaste 04**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Considerando as dispersões estatísticas na condição de desgaste 04, a Figura 68 apresenta a RMS, Curtoses e Skewness. Considerando a análise por RMS, apresentada na Figura 68(a), nota-se pela primeira vez nos teste uma homogeneidade do sinal RMS em relação ao patamar de controle, Sharma et al. (2017b) propõem que em o RMS esta intimamente ligado as interações, logo considera-se a redução da área de contato pela emulação o responsável pela constância, já que os eventos teoricamente tende a uma maior constante. Como também exposto anteriormente, a Curtoses e a Skewness não foram conclusivas.

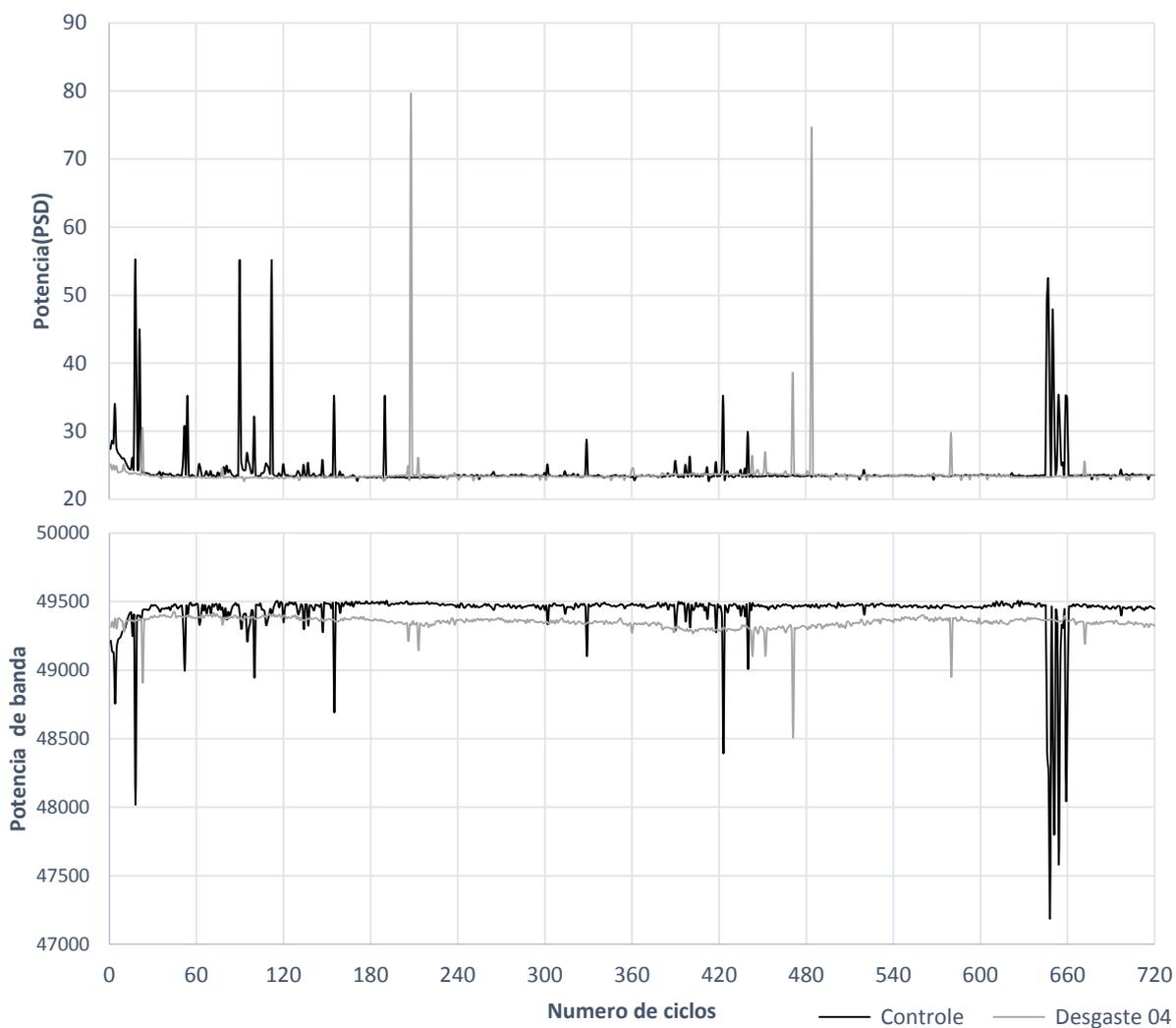
**Figura 68 – Dispersão dos dados estatísticos do sinal de desgaste 04**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

As técnicas de processamento baseadas na energia inerente ao sinal de EA são exibidas na Figura 69 em quem observa-se os dados de PSD e energia de banda. A dispersão dos dados de PSD, não apresentaram uma dispersão

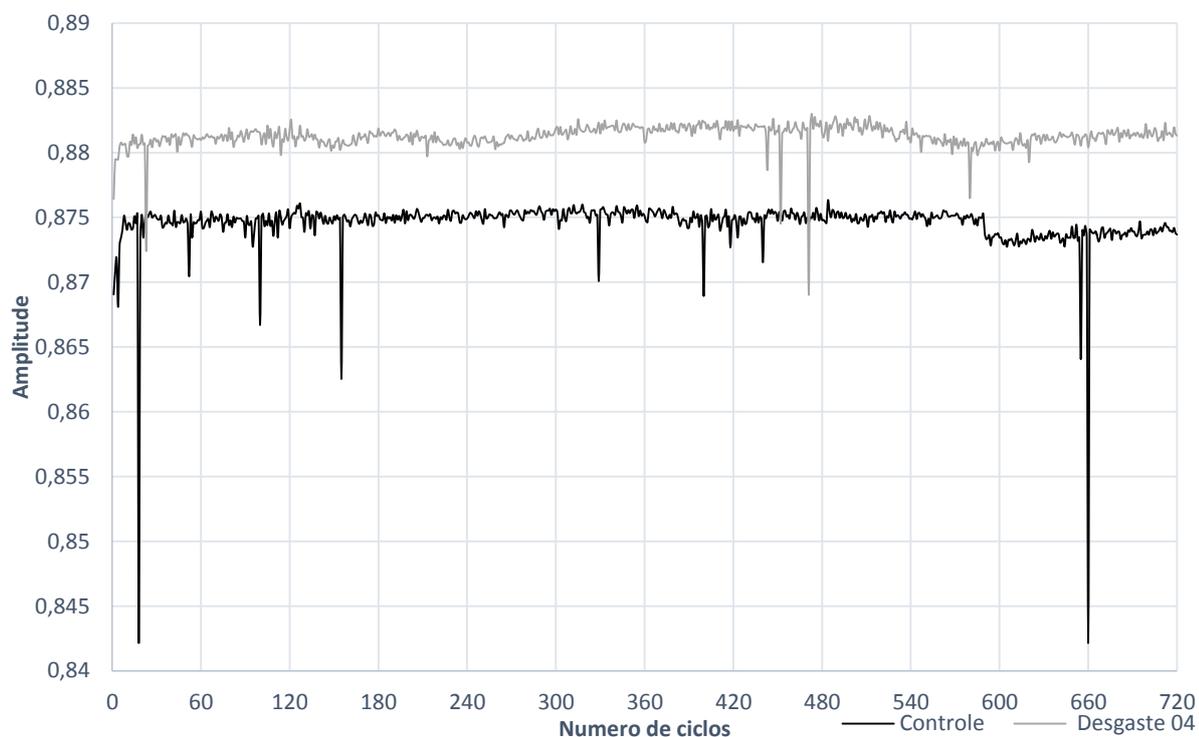
significativa com relação a distribuição de controle, enquanto os dados de energia divergiram consideravelmente.

**Figura 69 – Dispersão dos dados energia associada ao sinal de desgaste 04**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

A condição da dispersão da EE, apresentada na Figura 70, expõem a homogeneidade do afastamento dos dados de desgaste emulado na condição 04 em relação a condição de controle. Esta condição, segundo Sharma et al. (2017b) e Zhang et al. (2015), se deve ao eventos mais constantes nas interações.

**Figura 70 – Dispersão da entropia Espectral do sinal de desgaste 04**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Considerando o tratamento dos dados proposto, a Tabela 5 apresenta os dados que apresentaram uma discrepância passível de análise.

**Tabela 5 - Pontos de análise no teste de desgaste 04**

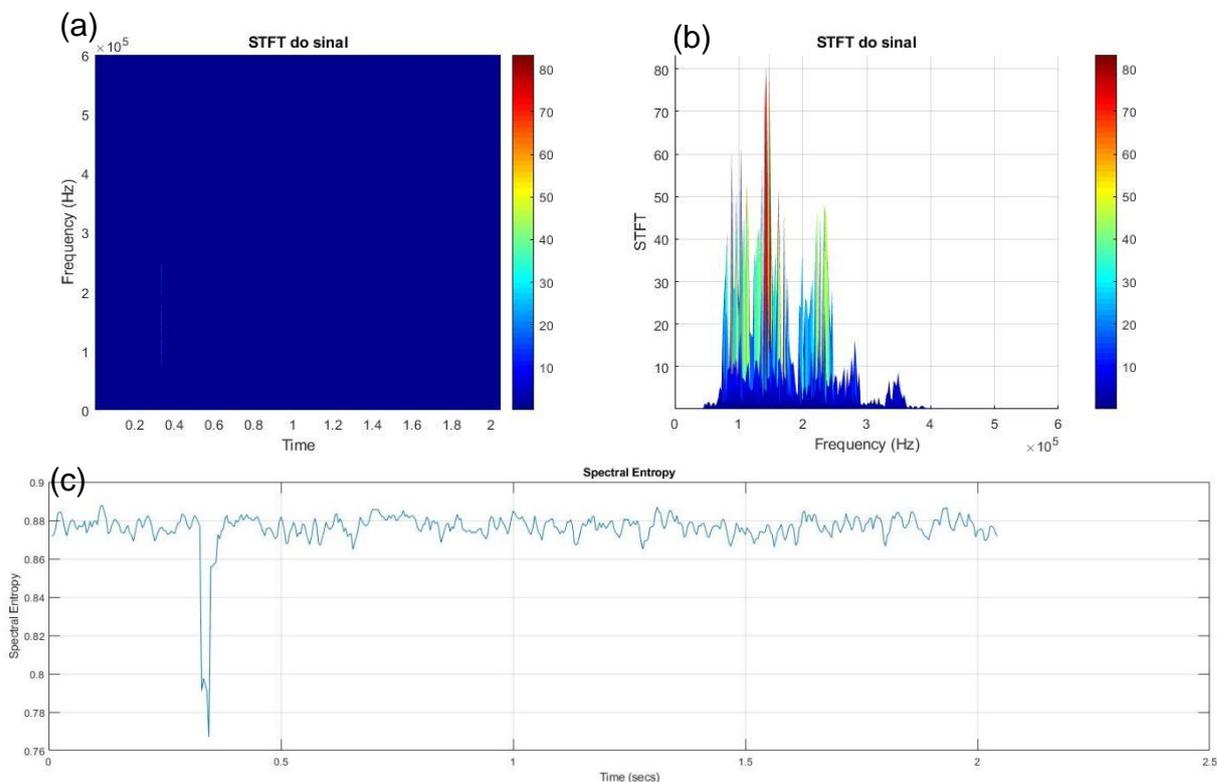
Defeito 04	RMS	78,208,361,484
	Kurtoses	78,208,361,471,484
	Skewness	208,361,471,484
	PSD	78,361
	Energia	78,208,361,484
	Entropia espectral	78,361,484

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A análise dos dados da condição de desgaste 04 apresentou comportamento semelhante em todos os pontos discrepantes, conforme exibido na Figura 71. Nota-se a propagação de uma trinca em um intervalo entre 0,2 a 0,4 na

STFT, Figura 71(a) e confirmada no gráfico de entropia espectral do sinal, Figura 71(c).

**Figura 71 - Análise do sinal de EA no 78° ciclo**



Quanto aos demais pontos, vistos no Apêndice E – COMPLEMENTO DAS ANÁLISES DA CONDIÇÃO DE DEFEITO 04apresentam, as seguintes constatações sobre a discrepância do sinal de EA:

- 208° ciclo: A análise da STFT do sinal apresentou a incidência de uma trinca, inviável em sua caracterização devido as condições do teste entre 1,4 a 1,6 segundos, entretanto, a Entropia Espectral revela uma provável trinca entre a janela já descrita como também entre 0,5 a 0,75 segundos;
- 361° ciclo: A STFT do sinal apresentou uma excitação típica de abertura de trincas em 1,2 segundos, condição confirmada na entropia espectral;
- 471° ciclo: A STFT do sinal apresentou uma excitação típica de abertura de trincas entre 1 a 1,2 segundos, condição confirmada na entropia espectral;
- 484° ciclo: Registrou-se na STFT do sinal uma excitação típica de abertura de trincas entre 1,8 a 2 segundos, também evidente na Entropia Espectral;

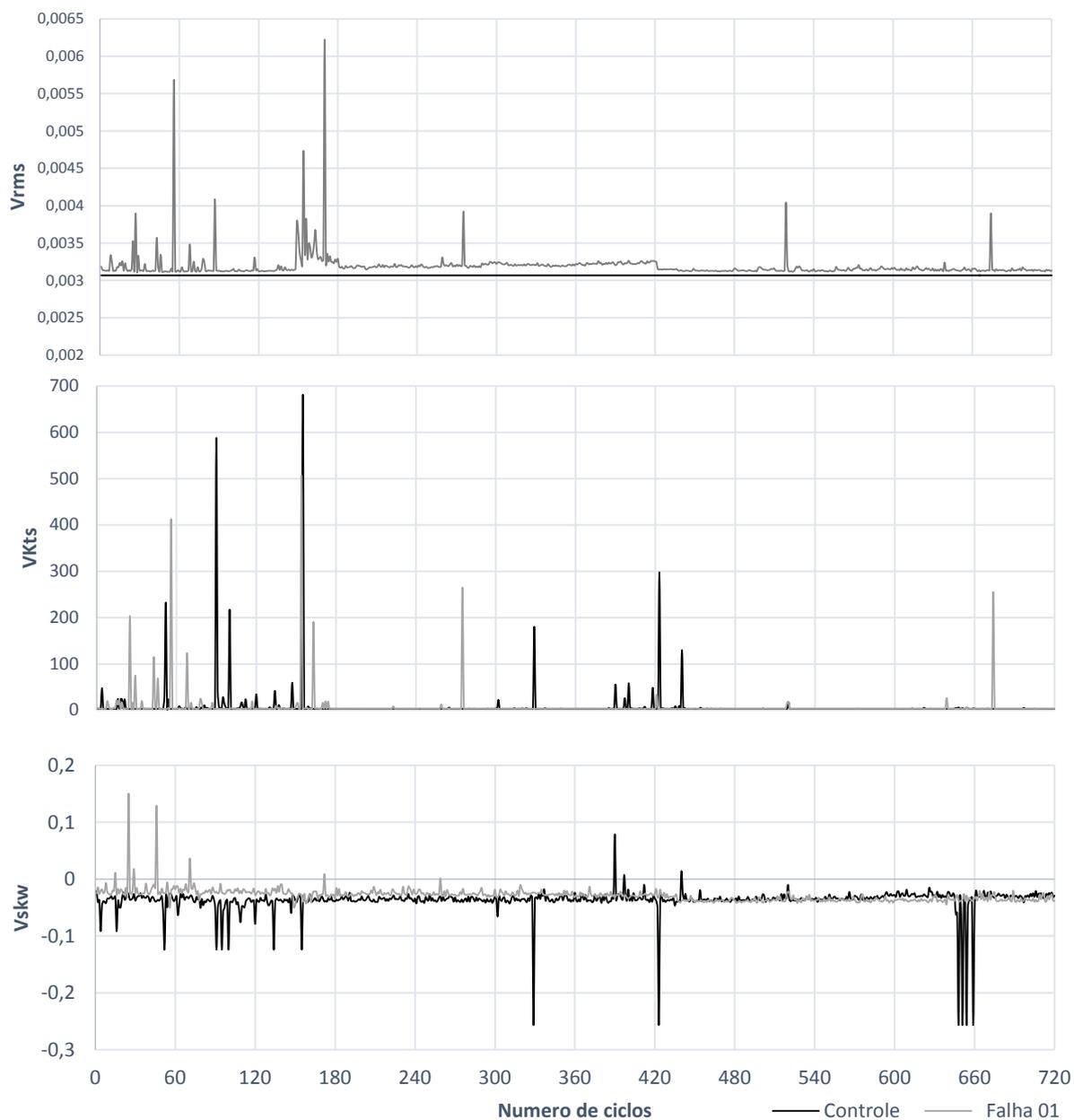
### **4.3. Análise das condições de falha induzida**

A composição da análise dos sinais de EA nas condições de falha induzido dividem-se nos 4 estados de emulação realizadas, em que se progride a falha de 1 em 1 mm na raiz de um dos dentes.

#### **4.3.1. Condição de falha induzida em 01 mm**

Apresenta-se na Figura 72 a dispersão dos dados estatísticos calculado para a condição de falha induzida em 1mm. De acordo com Sharma et al.(2017) o modelo de evolução do sinal do RMS em trincas induzidas tende a ser crescente quanto a evolução da trinca, esta proposição entra em consonância com os resultados obtidos, em que o caso emulado reportou um aumento nos resultados do sinal. Em contraste com a similaridade da RMS com a teoria apresentada, a dispersão da curtoses e da Skewness não se demonstram passíveis de uma análise quanto a discrepância entre a falha reportada e a condição de controle.

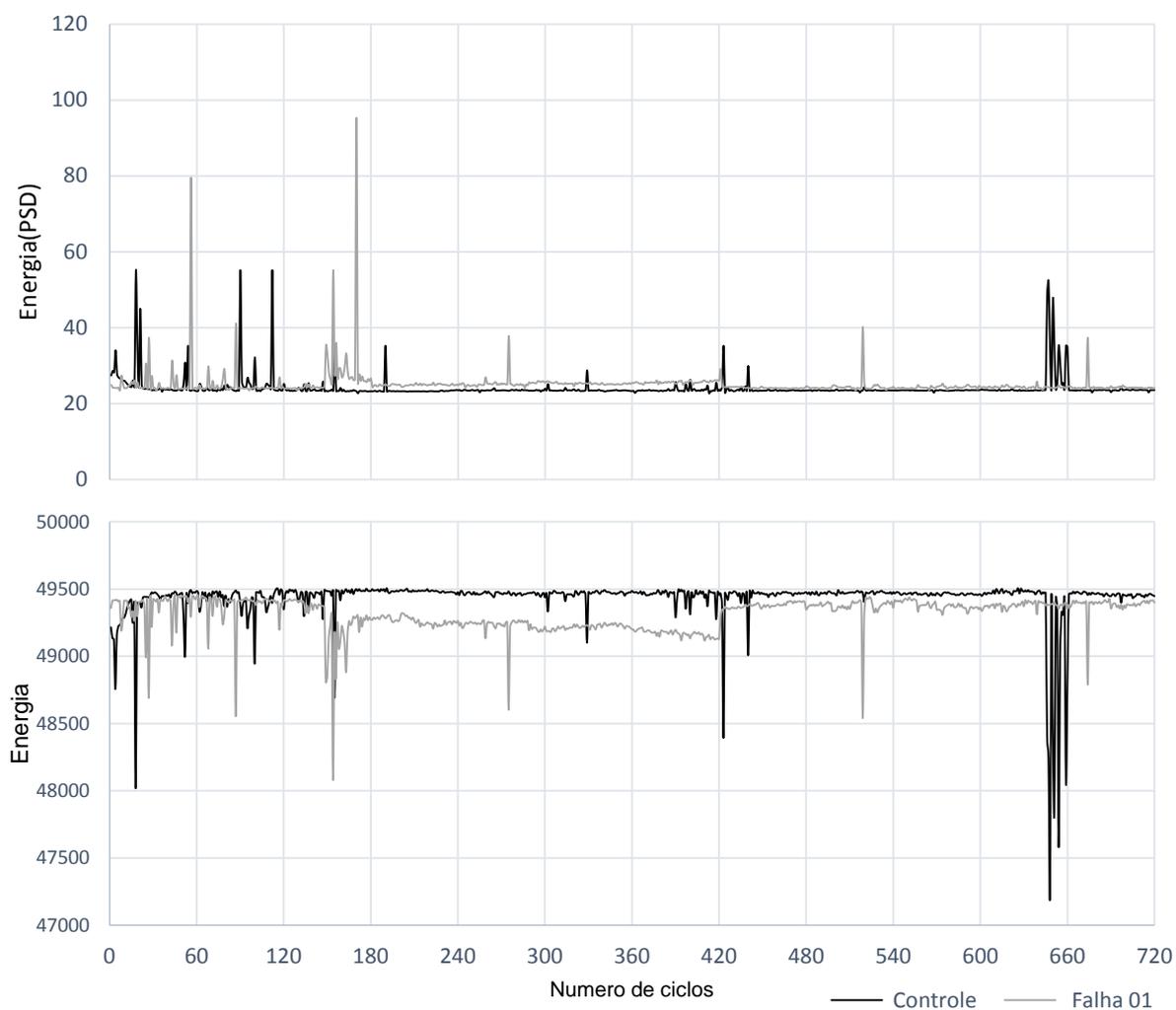
**Figura 72 - Dispersão dos dados estatísticos do sinal de falha em 01 mm**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

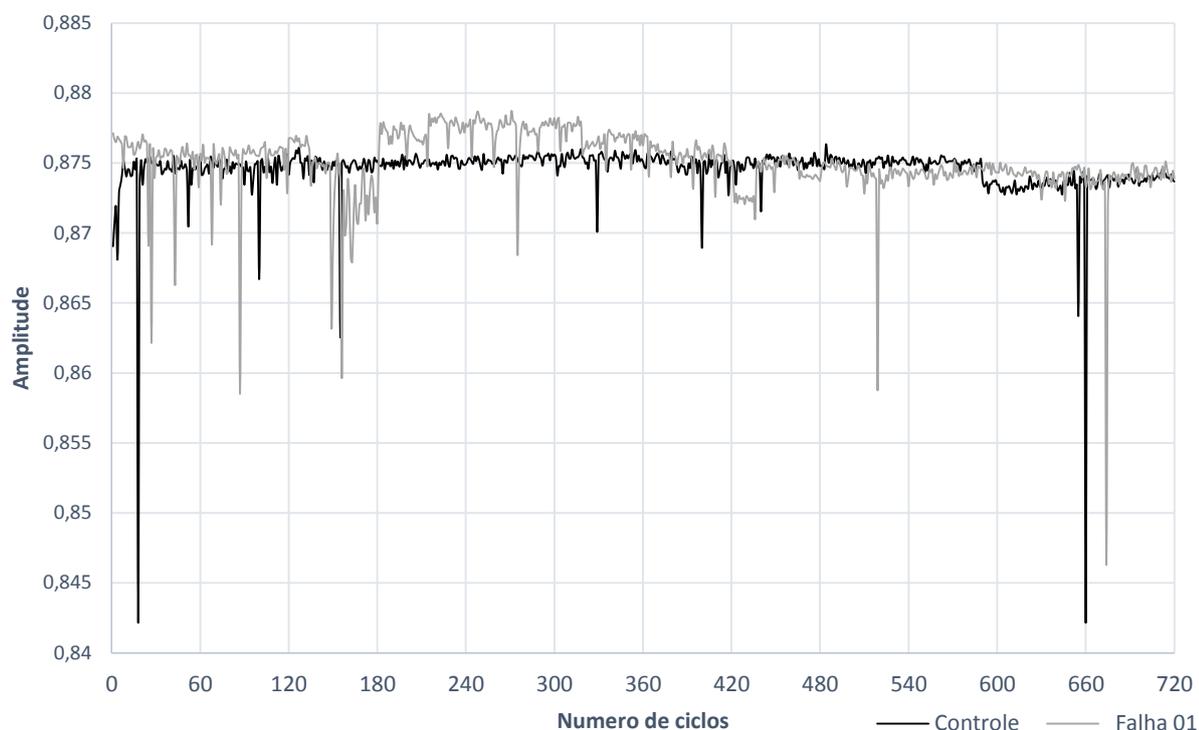
Considerando a abordagem pelas técnicas da PSD e da potencia de banda do sinal, apresentadas na Figura 73, não se registrou variações significativas na análise dos gráficos comparativos entre PSD na falha em 1 mm e na condição de controle. Já a potencia de banda apresentou uma queda entre os ciclos 150 a 420, entretanto esta condição não resultou em um maior volume de sinais considerados discrepantes.



**Figura 73 - Dispersão dos dados energia associada ao sinal de falha em 01 mm**

**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

De maneira análoga a análise da Potência, a EE apresentou perturbações entre os ciclos 150 a 420, conforme destacado na Figura 74. Esta discrepância resultou em um maior número de pontos destacados para análise, diferentemente da situação anterior, isso se deve a maior sensibilidade e homogeneidade apresentada pela EE.

**Figura 74 - Dispersão da entropia Espectral do sinal de falha em 01 mm**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Tabela 6 - Pontos de análise no teste de falha em 01 mm**

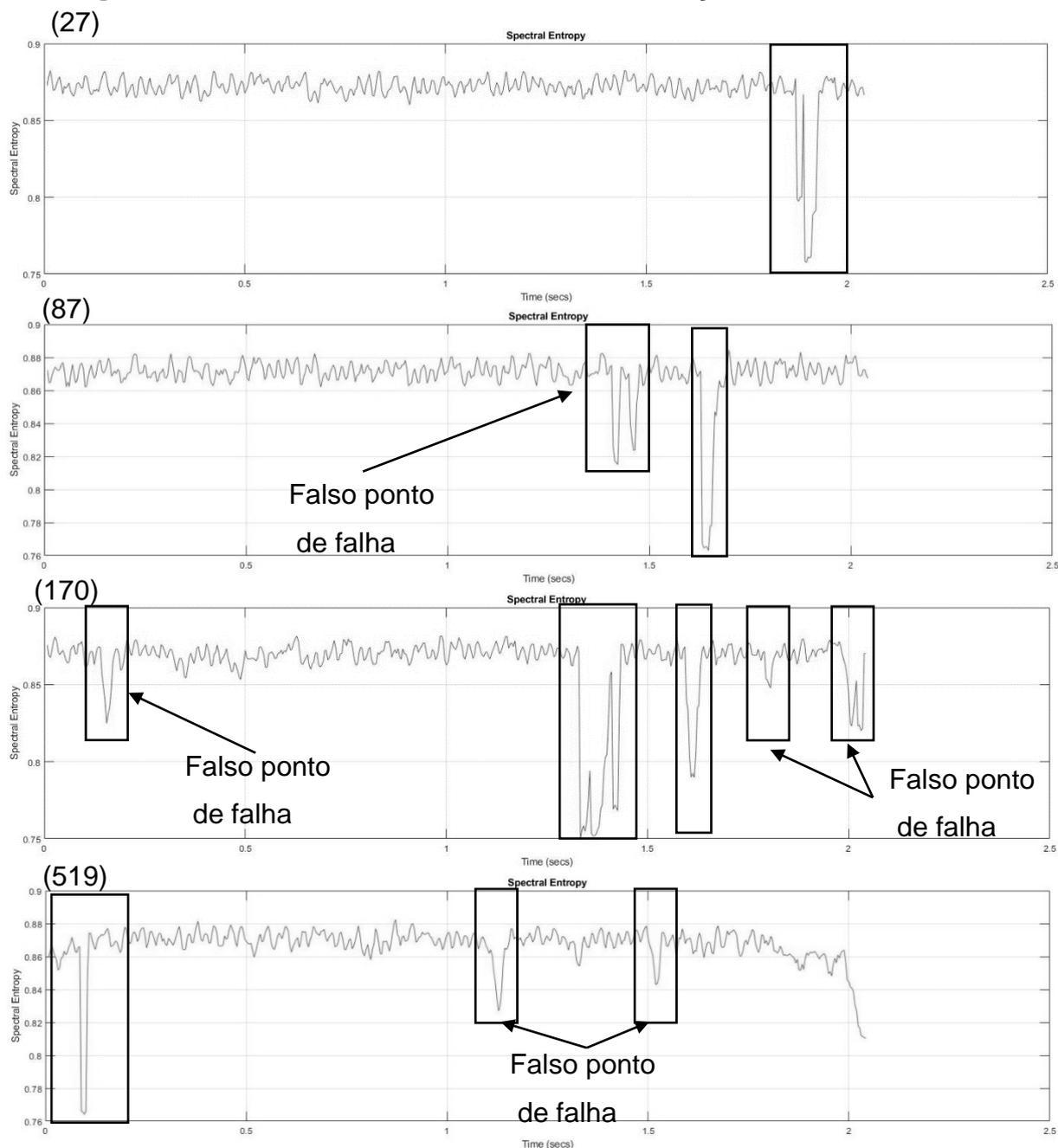
Falha 01	RMS	79,421
	Kurtoses	27,79,87,170,519
	Skewness	27,79,87,154,163,170,275,519,674
	PSD	79,421,56,79,170,421
	Energia	46,79,154,170,421
	Entropia espectral	27,46,56,79,87,154,170,163, 275,421,519,679

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Divide-se os ciclos destacados entre os resultados entre os motivos interpretados na análise do sinal, entre a provável indicação de falhas, comportamento anômalo e volume de eventos. A Figura 75 reporta quatro sinais selecionados nos ciclos em que se reportaram falha, sendo esses 27,56,87,163,170 e 519, a queda brusca da entropia espectral(EE), indicada nos gráficos, tendem a gerar uma interpretação de falha no intervalo coletado, inferência das interpretações

apresentadas por Zhang et al. (2015). A confirmação da interpretação vem da interpretação da STFT, apresentada na Apêndice F – COMPLEMENTO DAS ANÁLISES DA CONDIÇÃO DE FALHA 01, ainda fica possível discutir sobre os falsos positivos dentro da EE, conforme indicado nos sinais apresentados, em que a STFT não apresentou a confirmação desta condição de falha.

**Figura 75 – Sinais indicativos de falha na condição de trinca em 1 mm**

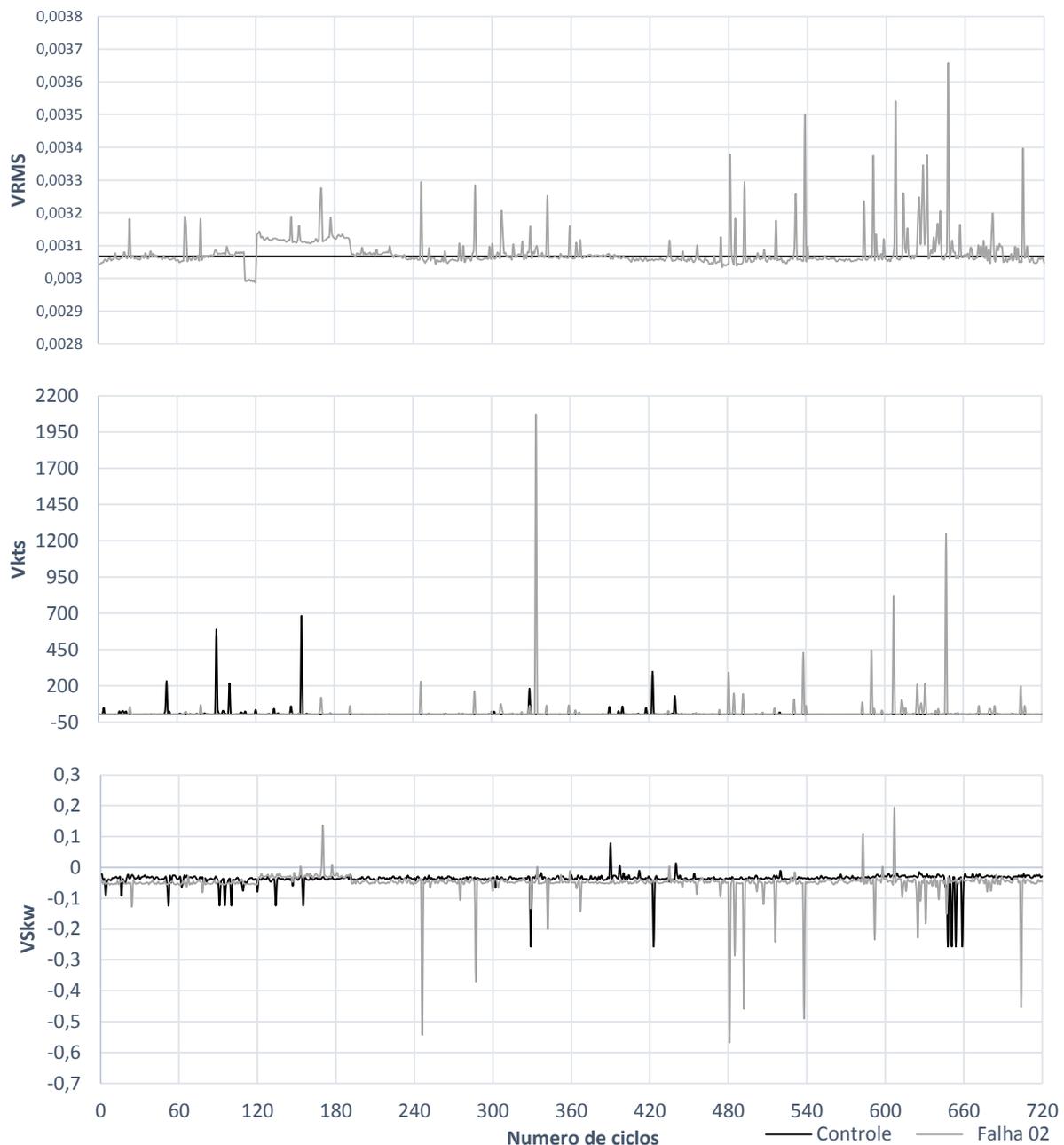


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

### 4.3.2. Condição de falha induzida em 02 mm

Apresenta-se na Figura 76 a dispersão dos dados estatísticos calculado para a condição de falha induzida em 2mm. A análise da dispersão entre em consonância ao proposto por Sharma et al. (2017), em que o RMS tende a apresentar uma variação com o aumento da trinca, sendo isso visível em alguns picos de afastamento entre os dados da condição analisada com o controle.

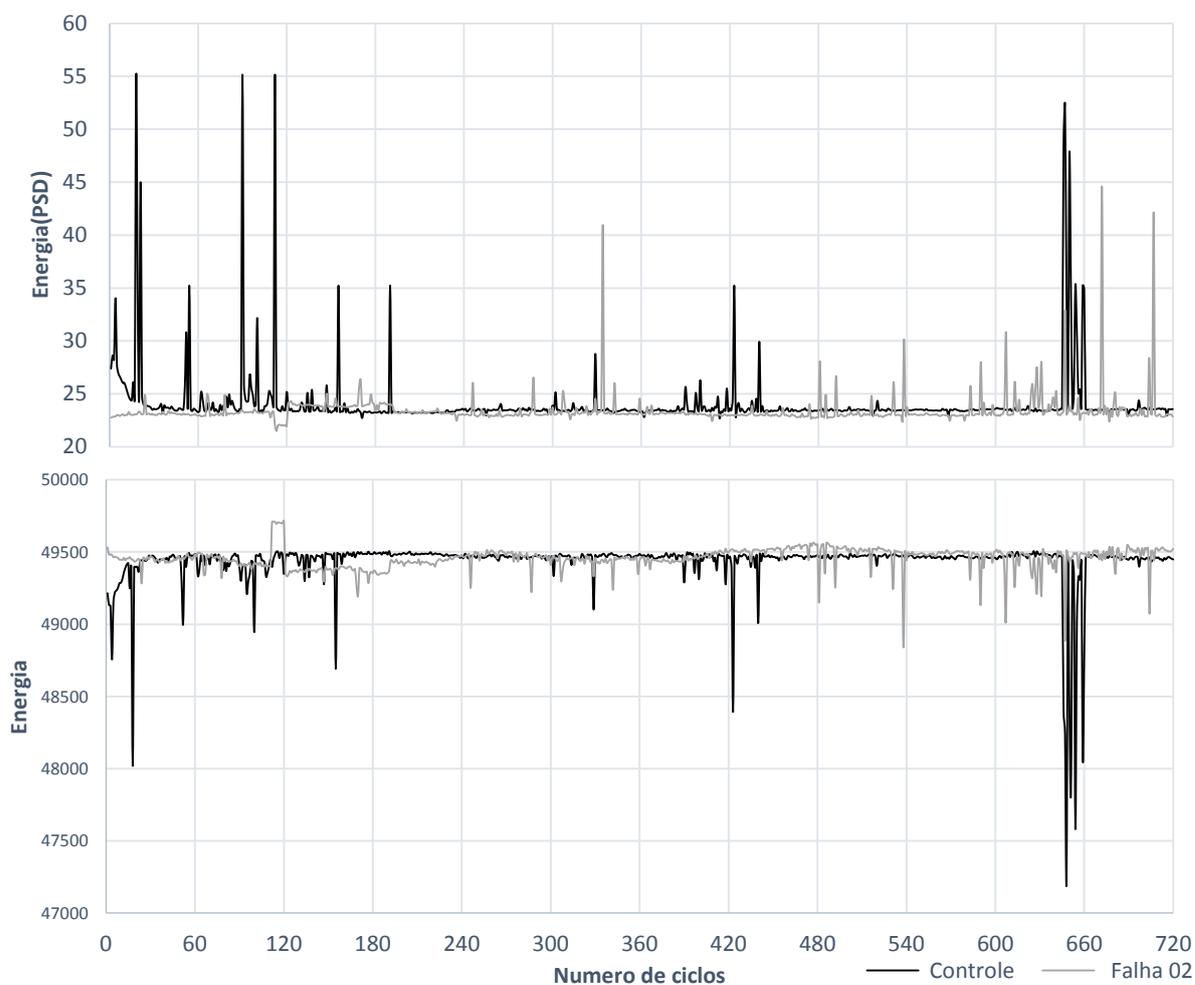
**Figura 76 - Dispersão dos dados estatísticos do sinal de falha em 02 mm**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

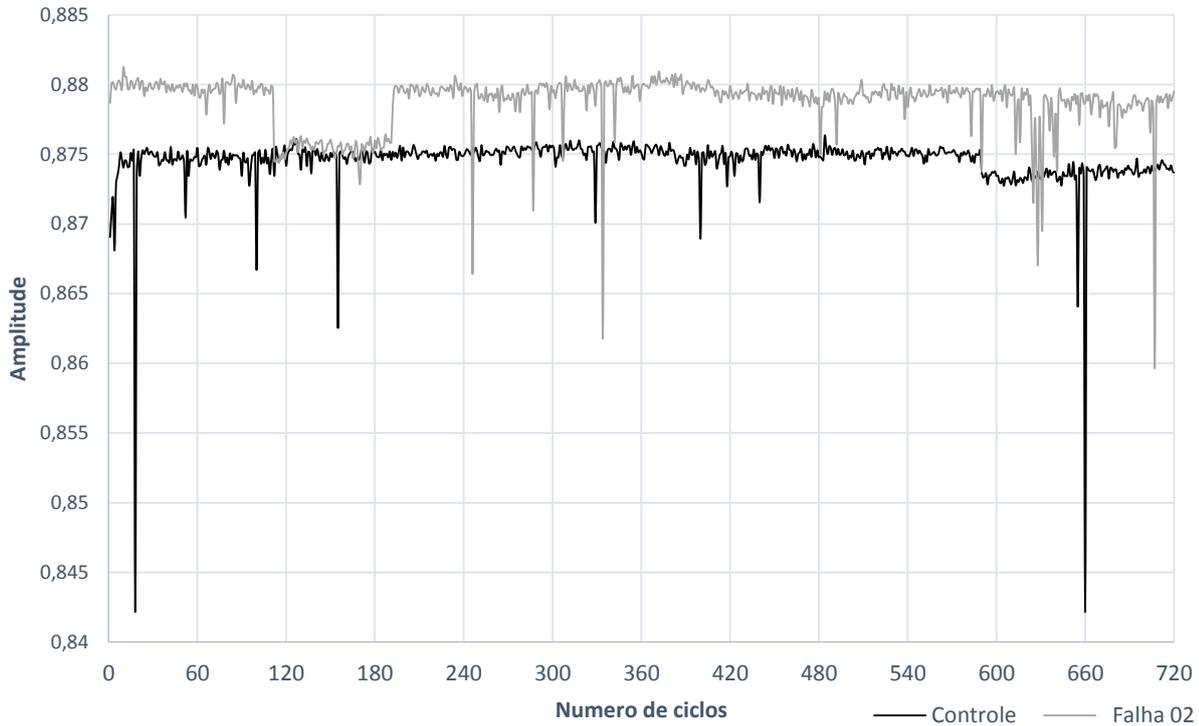
As dispersões dos dados de PSD e de potência de banda, vistos na Figura 77, não apresentaram uma conclusão significativa quanto ao afastamento das condições de controle, entretanto, indicaram alguns pontos de análise qualitativa.

**Figura 77 - Dispersão dos dados energia associada ao sinal de falha em 02 mm**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Considerando a dispersão da Entropia Espectral (EE), registrou-se uma certa homogeneidade quanto ao patamar de concentração dos dados, a janela de informações entre 110 a 190 apresentou uma queda, mas não o suficiente para gerar uma análise mais detalhada, uma vez que não satisfaz os critérios adotados.

**Figura 78 - Dispersão da entropia Espectral do sinal de falha em 02 mm**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Tabela 7 apresenta os pontos considerados discrepantes de acordo com os critérios adotados para análise detalhada.

**Tabela 7 - Pontos de análise no teste de falha em 02 mm**

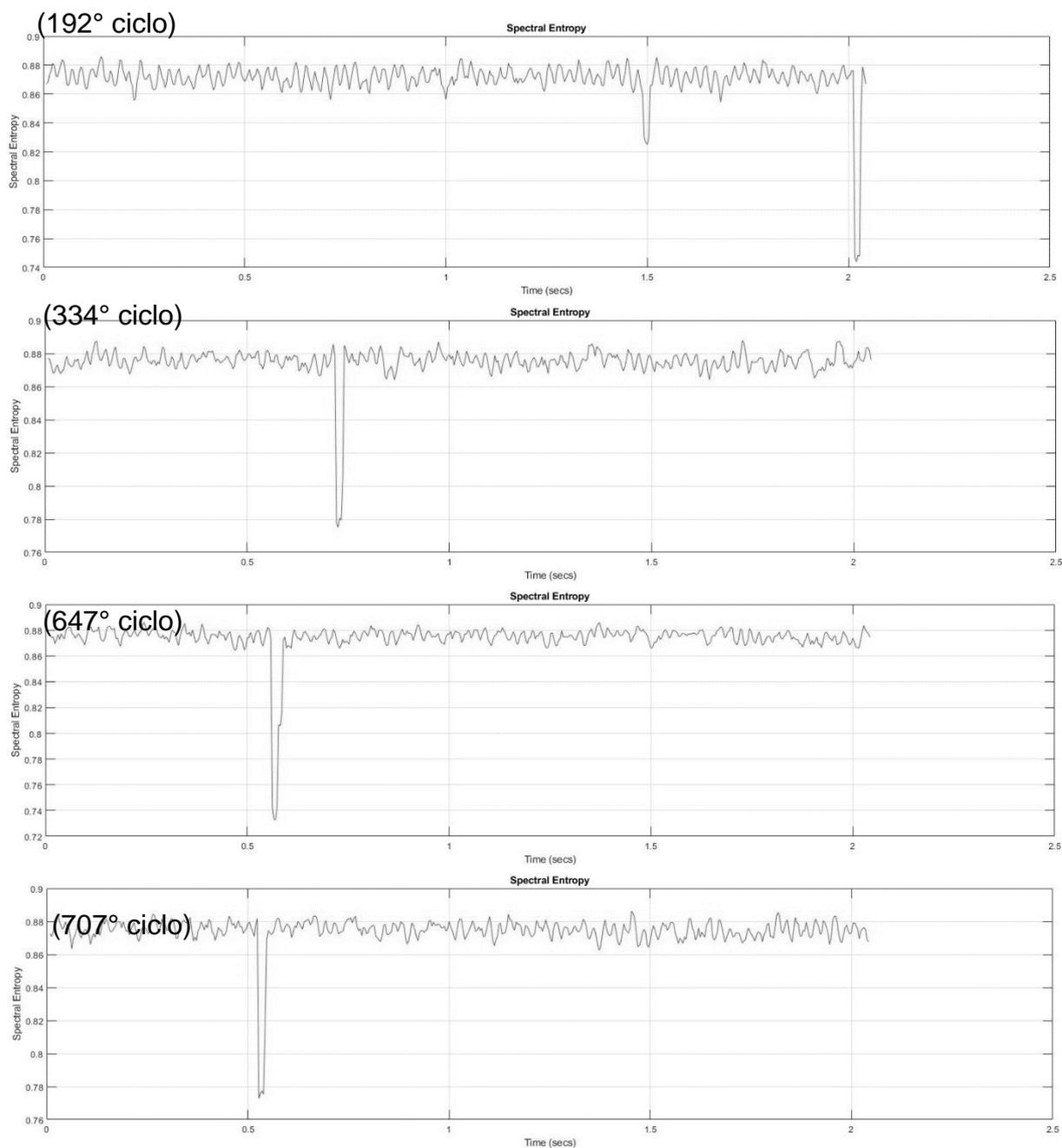
Falha 02	RMS	192,334,540,614,672,684,707
	Kurtoses	192,540,614,672,684,707
	Skewness	192,540,590,614,672,684,707
	PSD	192,540,614,684
	Energia	192,334,540,614,672,684,707
	Entropia espectral	192,334,540,607,614,617,647,672,684, 707

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Considerando os pontos destacados, registra-se uma certa repetibilidade em um volume significativo dos dados, nos ciclos 192,334,540,590,607,647,672,684 e 707. Observou-se uma queda significativa em todos os casos semelhante ao demonstrado na Figura 79 em que se exemplifica as EEs do ciclos 192,540,647 e

707, de acordo com Zhang et al. (2015), esta queda reporta uma provável falha, condição confirmada analisando as STFTs dos sinais, estes últimos apresentados no Apêndice G – COMPLEMENTO DAS ANÁLISES DA CONDIÇÃO DE FALHA 02

**Figura 79 - Sinais indicativos de falha na condição de trinca em 2 mm**

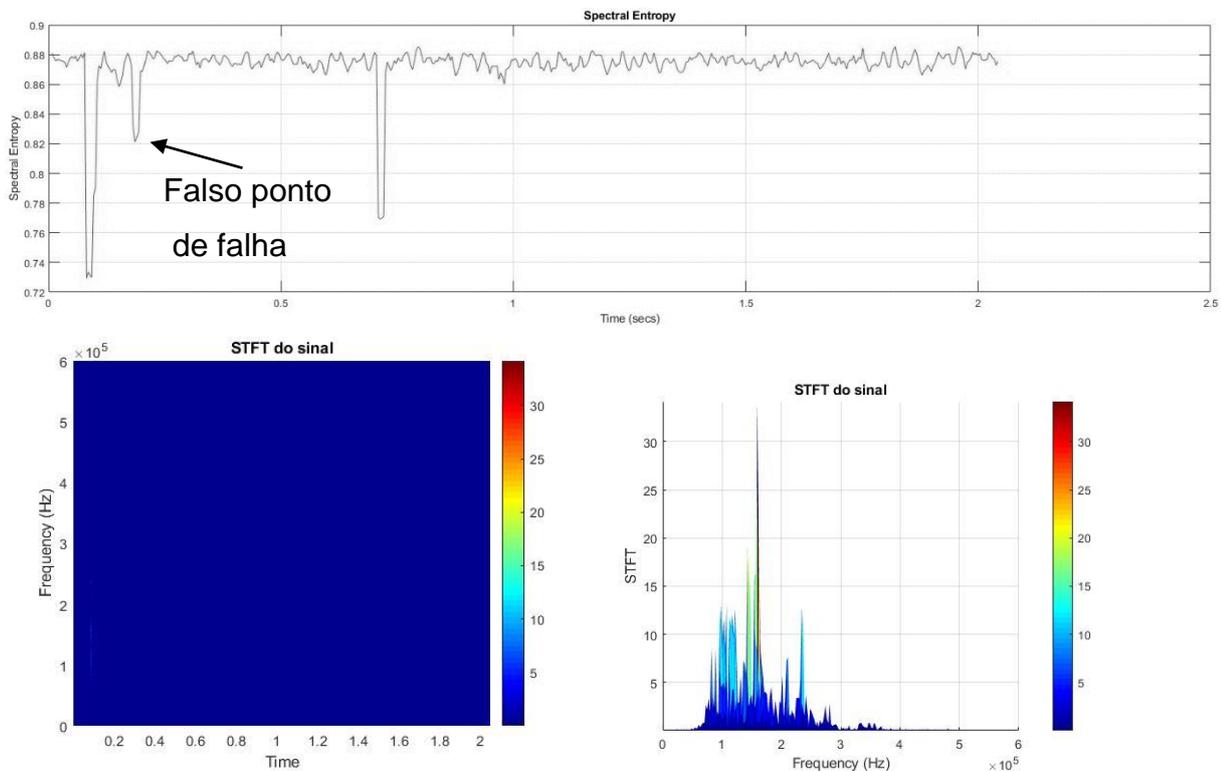


**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Demonstra-se ainda a ocorrência de falsos positivos entre os casos indicados como foco de análise, esta inferência é reportada segundo a análise conjunta entre

STFT e EE, conforme se aplica em paralelo os estudos de Hase et al. (2012), Zhang et al. (2015), Jakitsch et al. (2018) e Hao et al. (2018).

**Figura 80 - Falso positivo reportado no 614° ciclo**

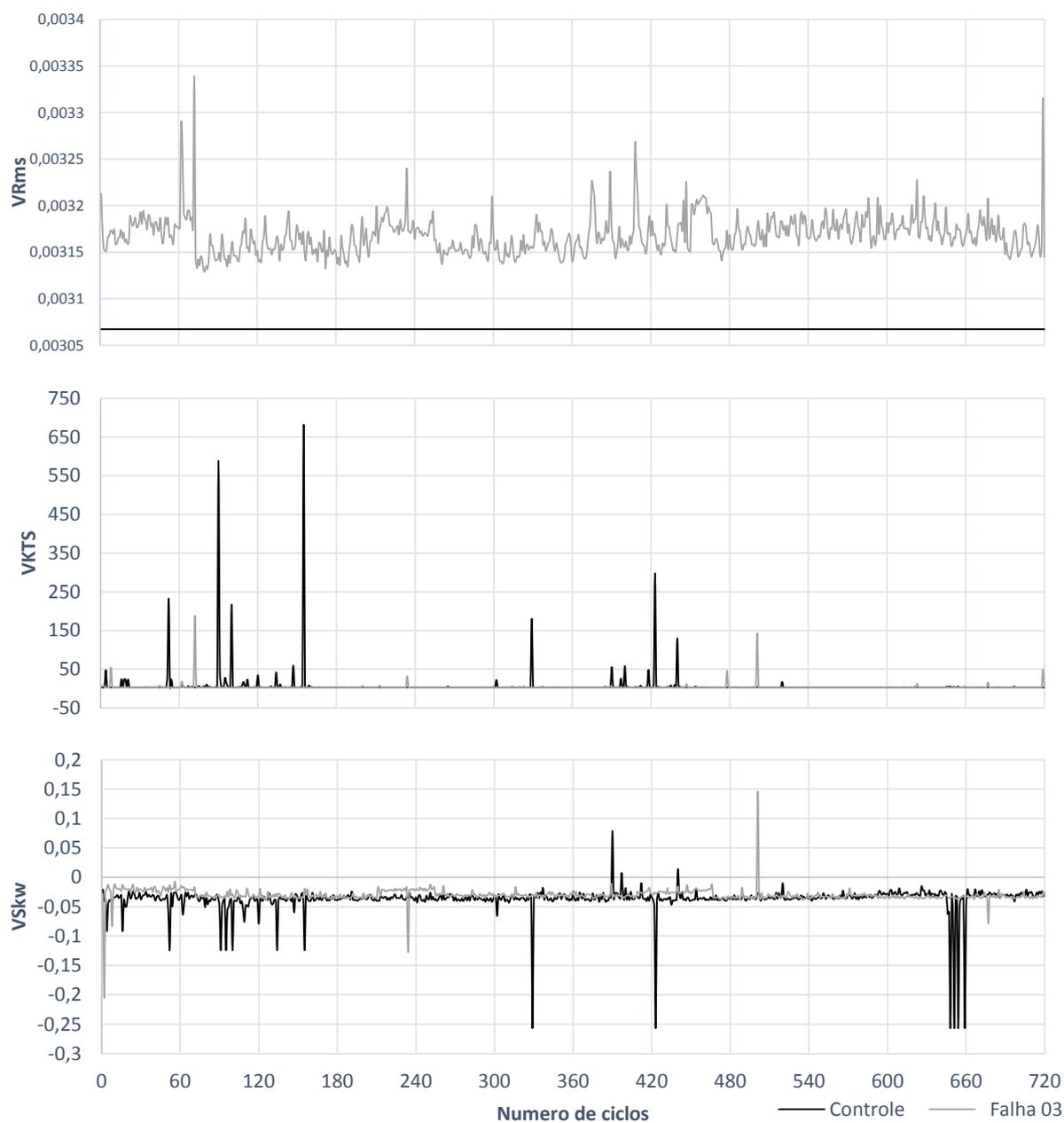


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

#### 4.3.3. Condição de falha induzida em 03 mm

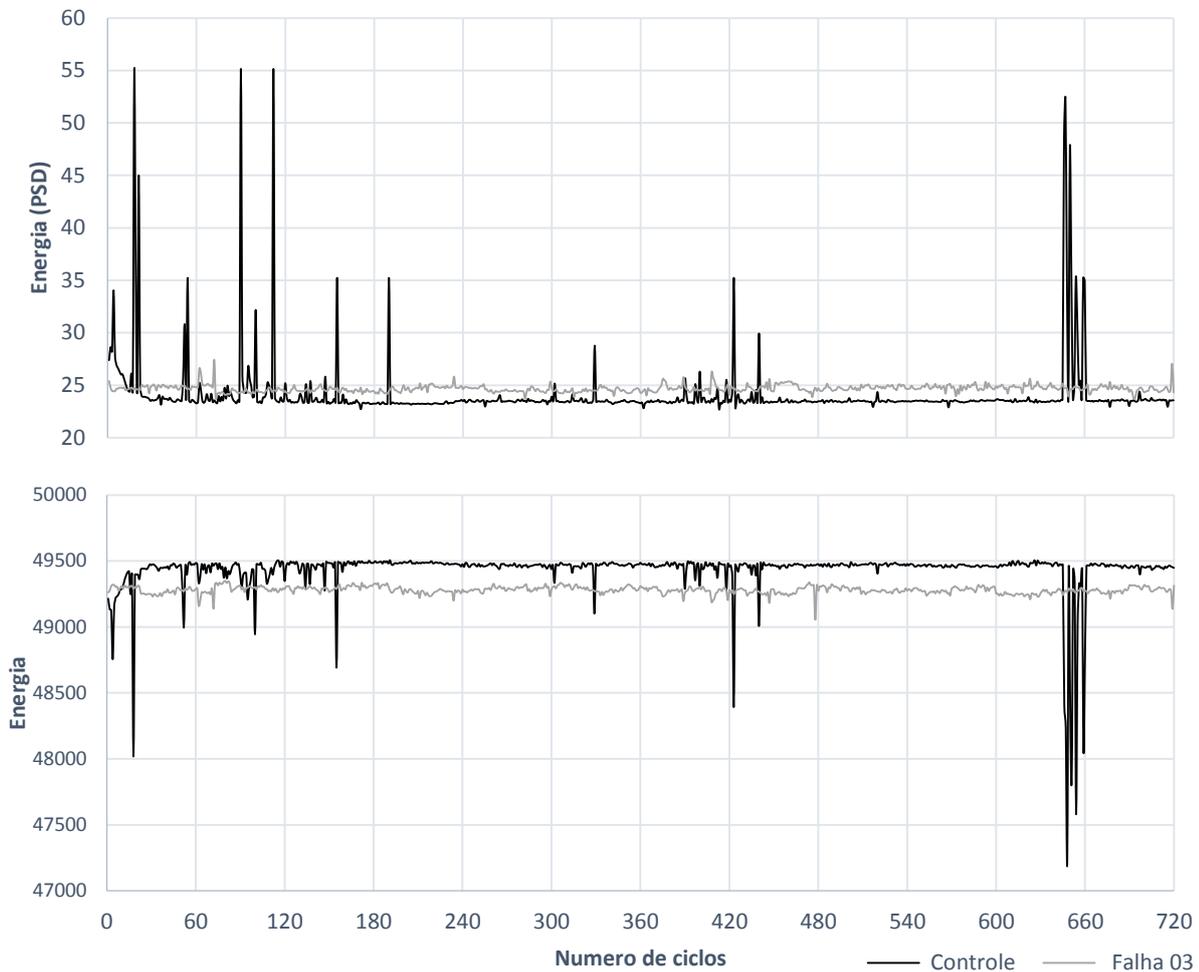
Apresenta-se na Figura 81 a dispersão dos dados estatísticos calculado para a condição de falha induzida em 3mm. A análise da dispersão entre em consonância ao proposto por Sharma et al. (2017), com o registro do primeiro caso de discrepância significativa entre os dados do teste e com o controle. Tanto a Curtoses e a Skewness não reportaram variações significativas

**Figura 81 - Dispersão dos dados estatísticos do sinal de falha em 03 mm**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

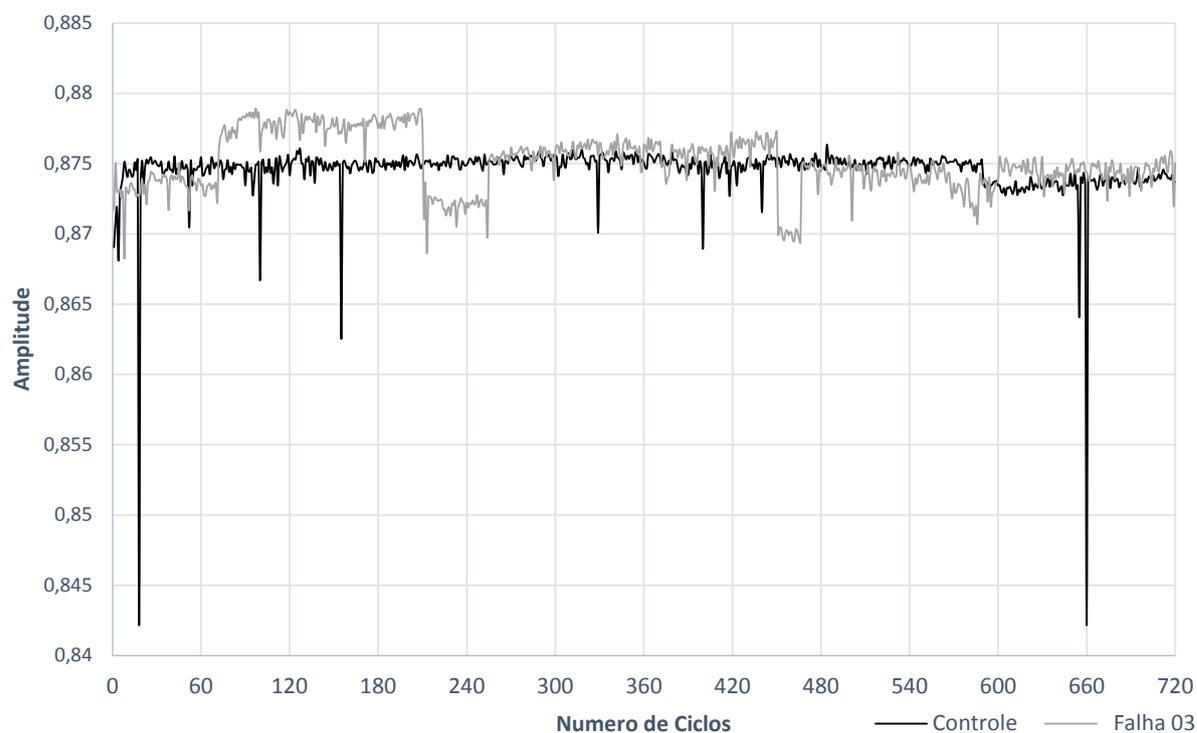
As dispersões dos dados de PSD e de potência de banda, vistos na Figura 82, não apresentaram uma conclusão significativa quanto ao afastamento das condições de controle, entretanto, indicaram alguns pontos de análise qualitativa.

**Figura 82 - Dispersão dos dados energia associada ao sinal de falha em 03 mm**

**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Considerando a dispersão dos dados de EE, apresentada na Figura 83, que, mesmo oscilando entre os dados de controle, apresentou o maior número de ciclos com sinais de EA discrepantes. A não manutenção de um patamar, dificultou uma análise mais detalhada do comportamento da técnica de processamento.

**Figura 83 - Dispersão da entropia Espectral do sinal de falha em 03 mm**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Tabela 8 apresenta os pontos considerados discrepantes de acordo com os critérios adotados para análise detalhada.

**Tabela 8 - Pontos de análise no teste de falha em 03 mm**

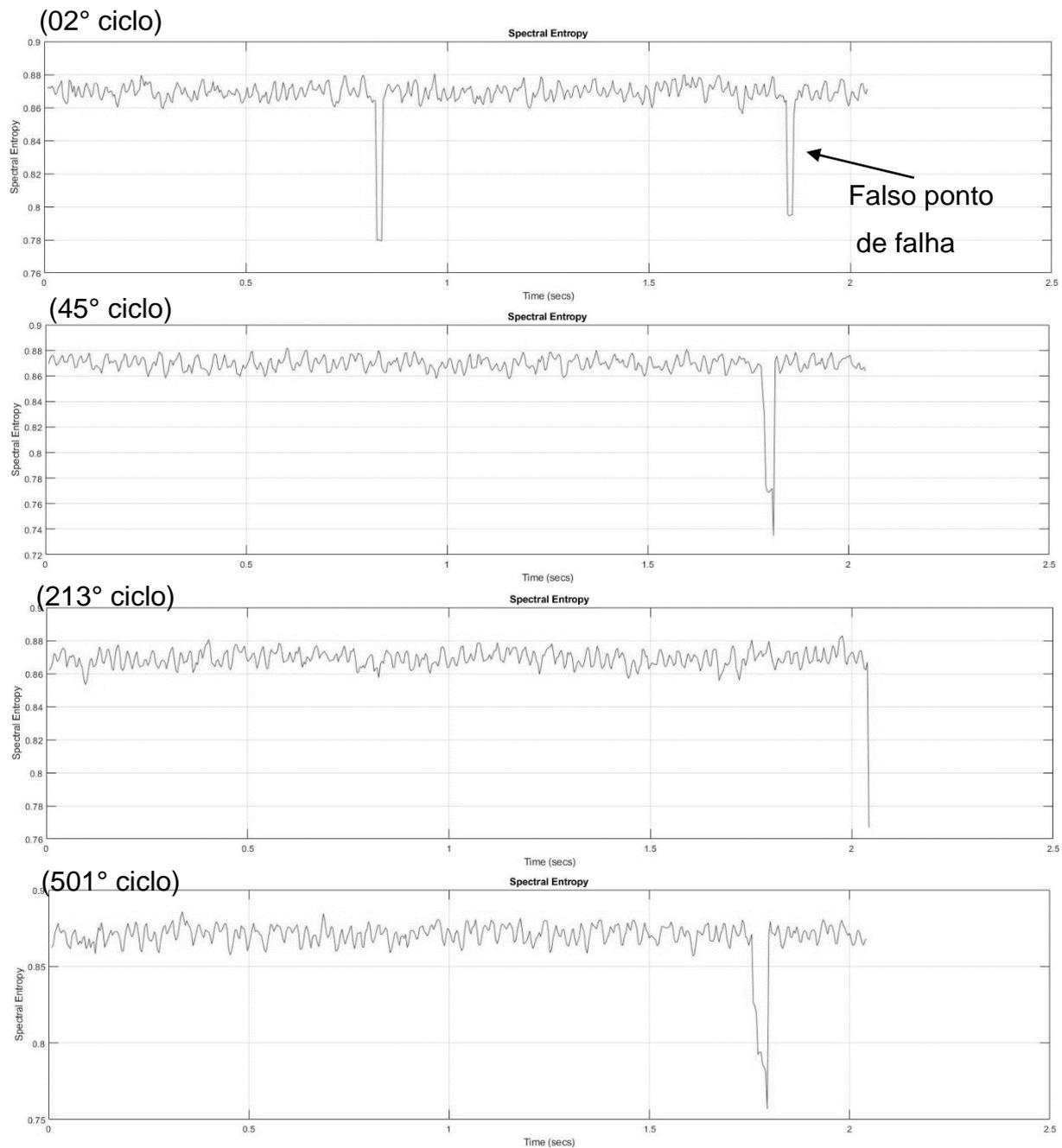
Falha 03	RMS	2,8,45,213,478,501
	Kurtoses	2,45,213
	Skewness	45,72,213,478
	PSD	2,8,45,213,478,501
	Energia	2,8,45,213,501
	Entropia espectral	2,8,45,72,213,478,501

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Ponderando sobre as indicações de pontos discrepantes, selecionou-se 4 pontos que reportaram o comportamento padrão observado, em todos os casos a EE apontou um ponto de provável falha corroborado pela interpretação da EE. As

STFTs e as EEs não apresentadas estão dispostas na Apêndice H –  
COMPLEMENTO DAS ANÁLISES DA CONDIÇÃO DE FALHA 03

**Figura 84 -Sinais indicativos de falha na condição de trinca em 3 mm**

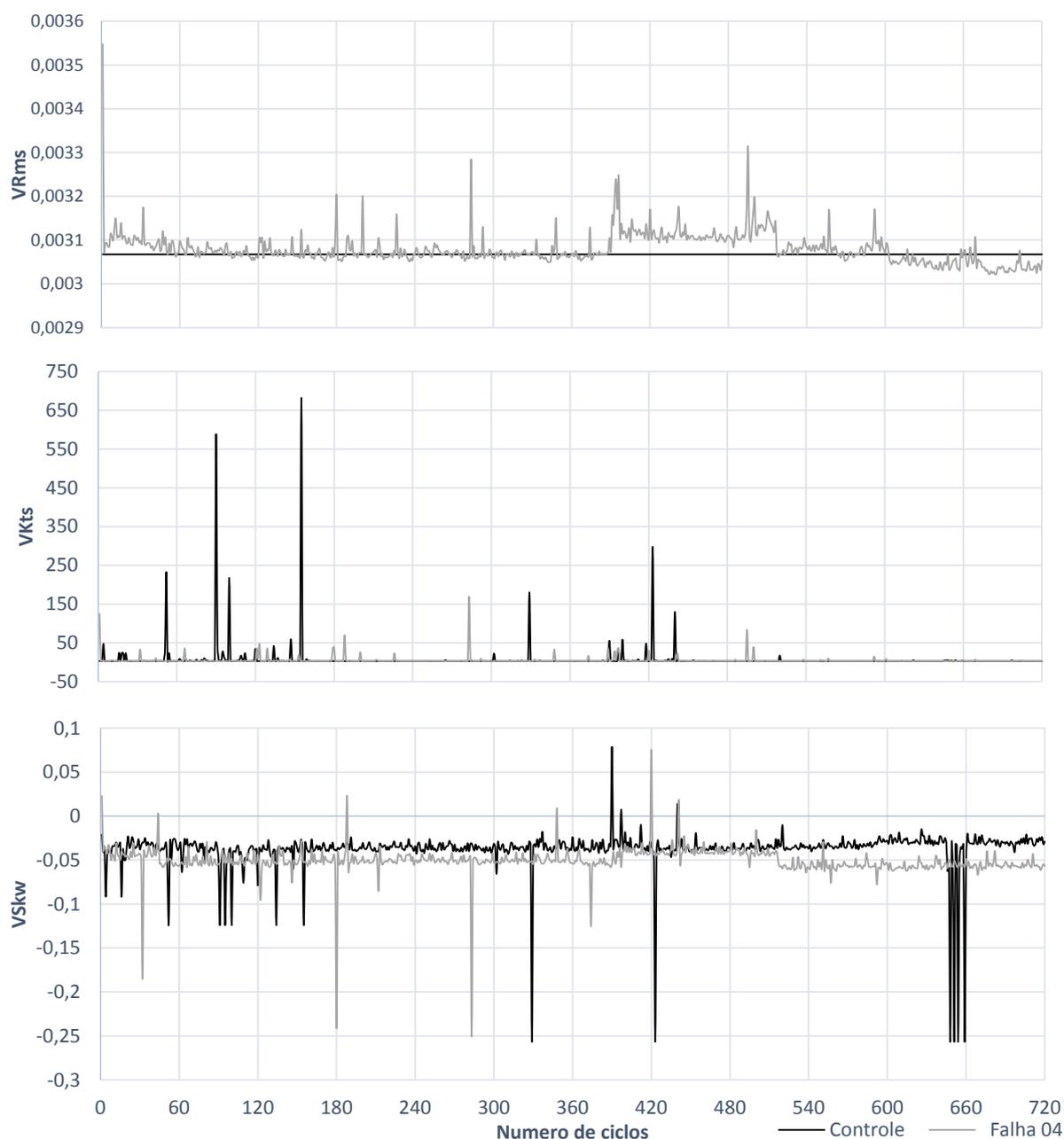


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

#### 4.3.4. Condição de falha induzida em 04 mm

Discute-se na Figura 85 a dispersão dos dados estatísticos do sinal na condição de falha 04. Nota-se uma homogeneidade na dispersão do sinal de RMS na região de concentração reportada na condição de controle. Divergindo das condições previamente apresentadas, não foi possível traçar um paralelo entre a condição e os sinais analisados.

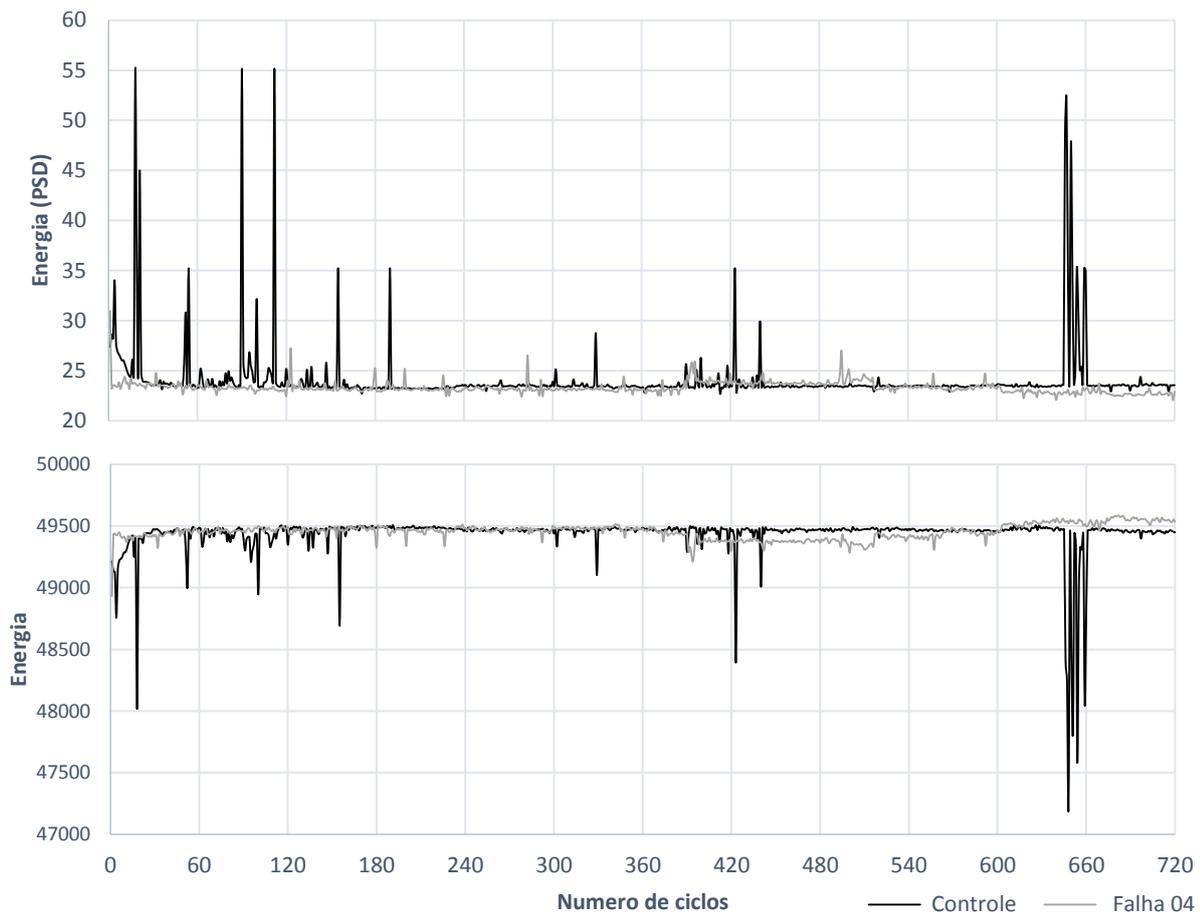
**Figura 85 - Dispersão dos dados estatísticos do sinal de falha em 04 mm**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

As dispersões dos dados de PSD e de potência de banda, vistos na Figura 86, não apresentaram uma conclusão significativa quanto ao afastamento das condições de controle, entretanto, indicaram alguns pontos de análise qualitativa.

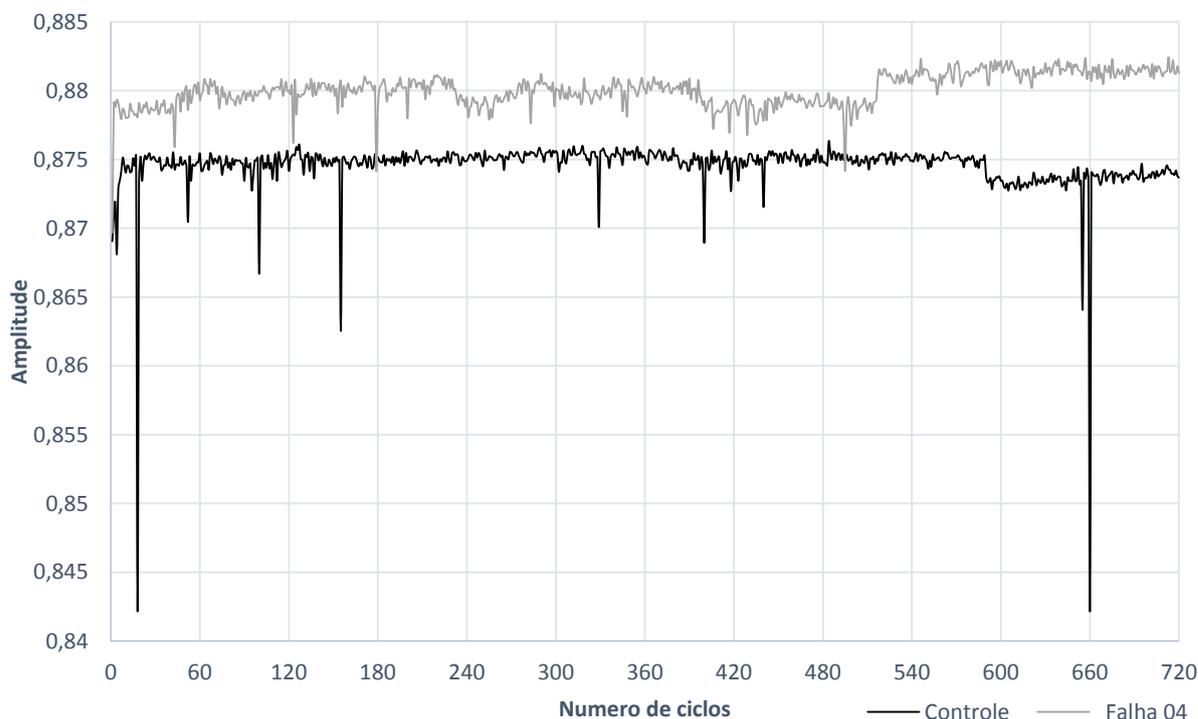
**Figura 86 - Dispersão dos dados energia associada ao sinal de falha em 04 mm**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Em divergência com a condição de falha induzida em 03 mm, a EE resultante nos ciclos em 04 mm apresentou significativa distorção quando comparado a condição de controle. Nota-se que após o ciclo 520 o patamar da EE sofreu uma alteração, levando a crer em uma mudança de estado da falha, mas que não gerou indicativos de acordo com os critérios estabelecidos.

**Figura 87 - Dispersão da entropia Espectral do sinal de falha em 04 mm**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Tabela 9 apresenta os pontos considerados discrepantes de acordo com os critérios adotados para análise detalhada.

**Tabela 9 - Pontos de análise no teste de falha em 04 mm**

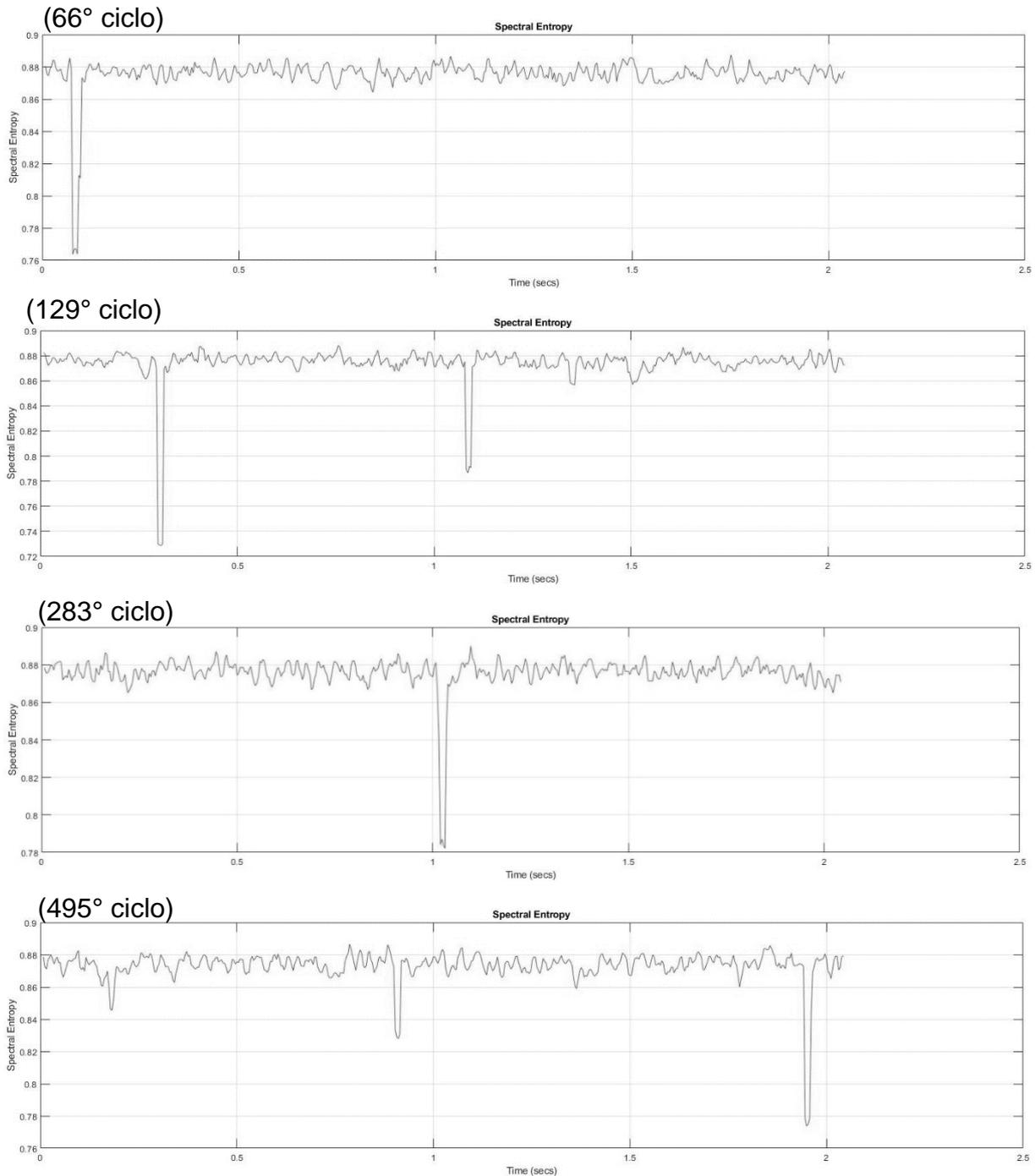
Falha 04	RMS	66,121,123,129,179,188,389,397
	Kurtoses	66,121,129,179,389,397
	Skewness	66,121,123,129,179,188,389,495
	PSD	66,121,129,179,188,389,397
	Energia	66,123,129,179,188,283,389,397
	Entropia espectral	66,121,123,129,179,188,283,389,396,397,495

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A aponta os sinais de entropia dos ciclos 66,129,283 e 495, em que se visualizou uma provável falha indicada pela queda brusca dos valões de EE, esta condição foi confirmada analisando as STFTs, vistas em no Apêndice I –

COMPLEMENTO DAS ANÁLISES DA CONDIÇÃO DE FALHA 04, assim como os sinais dos ciclos 121,123,179,396 e 397, que reportaram a mesma característica.

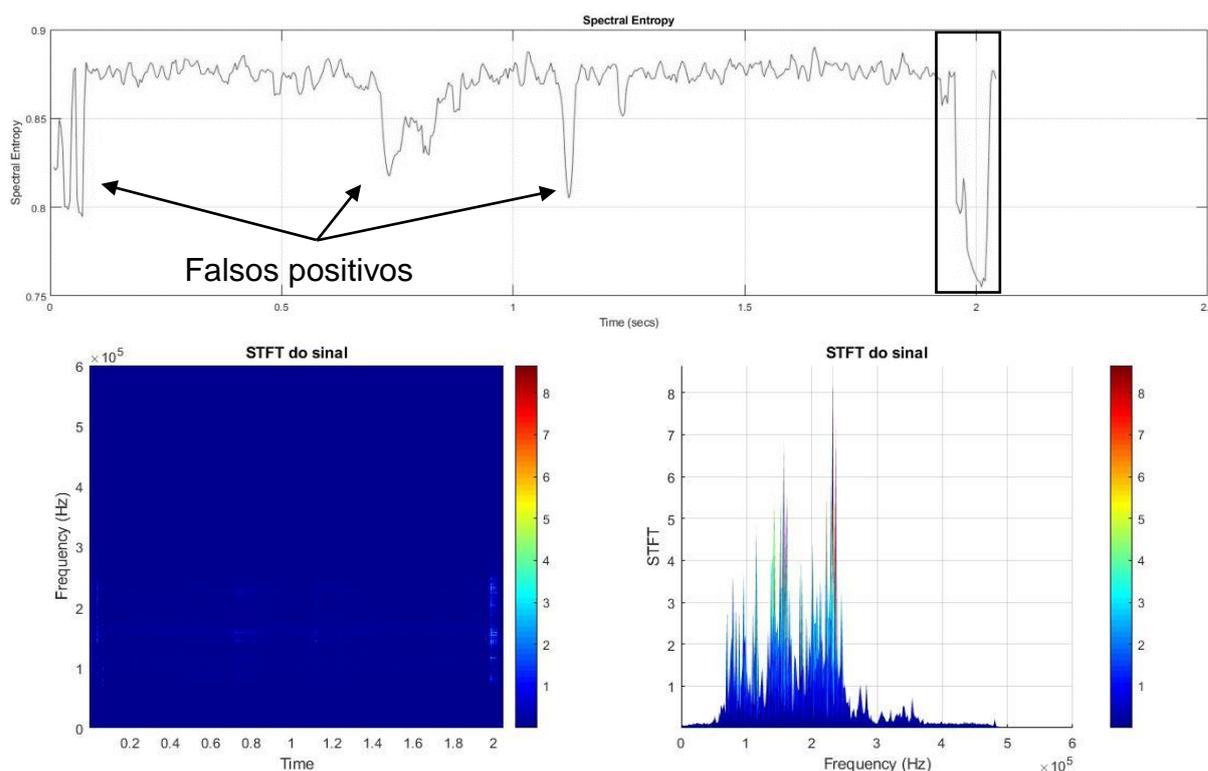
**Figura 88 - Sinais indicativos de falha na condição de trinca em 4 mm**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

O sinal do ciclo 188 apresentou um volume de falsos positivos, conforme visto na Figura 89, os falsos positivos são confirmados pela STFT que não reportou nenhum comportamento anômalo nos intervalos de falsos positivos.

**Figura 89 - Falso positivo reportado no 188° ciclo**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

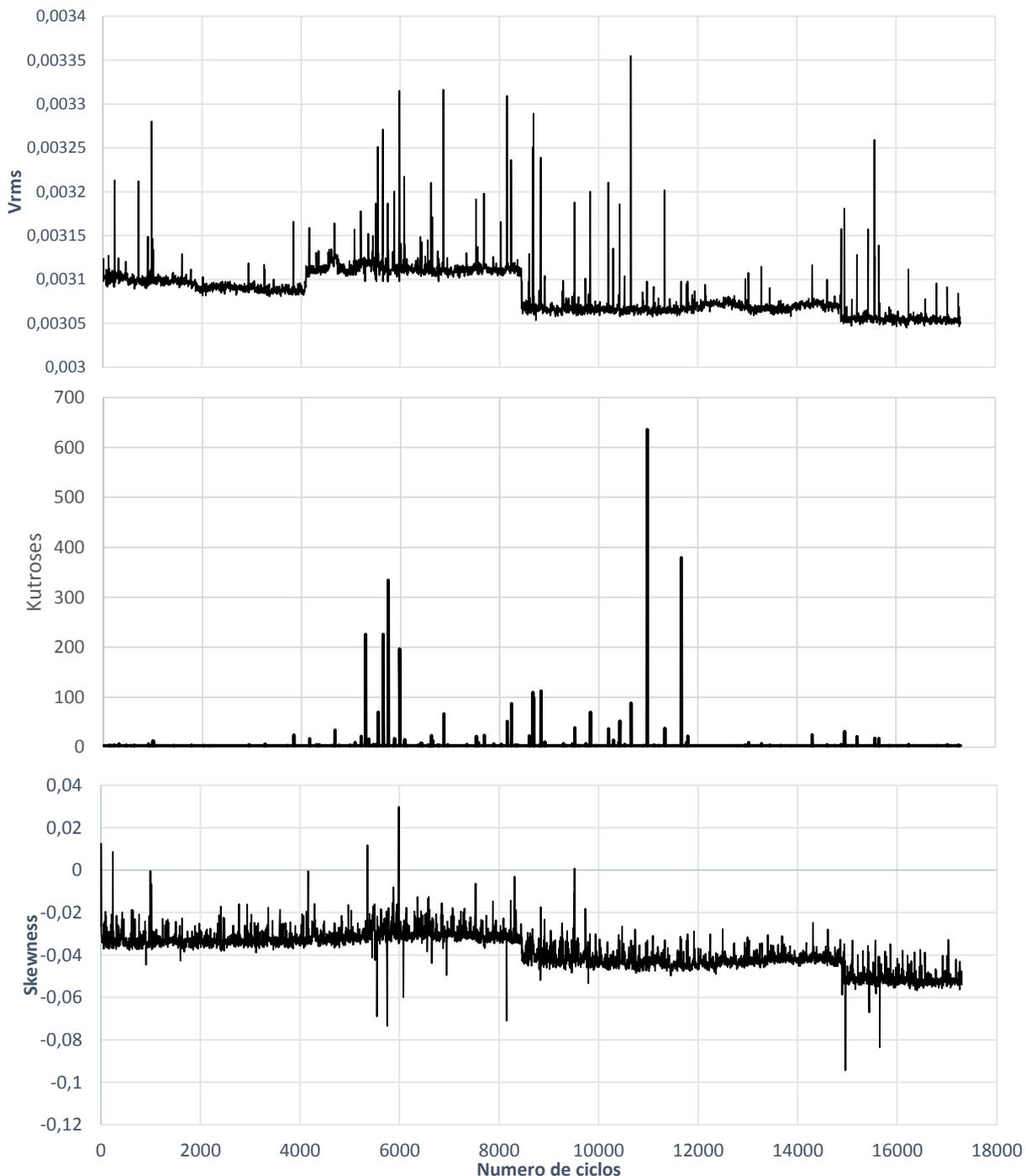
#### 4.4. Condição de teste em maiores velocidades

Tendo em vista a caracterização do sinal previamente apresentada nas condições de desgaste e trinca induzidas, optou-se pela realização de um teste em uma velocidade 8 vezes maior que as anteriormente empregadas, considerando assim uma condição de desgaste emulado com 60 furos sobre a superfície de contato. Aponta-se ainda que as 72 horas-teste transcorreram sem interferências externas não programadas bem como registrou-se fontes adicionais de sinal.

Considerando os sinais resultantes, optou-se por processar os sinais em intervalos de 12 horas, sendo assim os ajustes de critério de análise também foram efetuados dessa maneira, o que resultou em um intervalo de sinais análogo ao dos testes previamente efetuados.

A Figura 90 apresenta as dispersões das variáveis estatísticas para a condição de teste proposta. Tratando especificamente dos valores e patamares de concentração de dados, tanto o RMS e a Skewness apresentaram comportamento análogo ao descrito nos testes anteriores na mesma condição de desgaste emulado. O que também reflete na dificuldade de interpretar as informações da Curtoses.

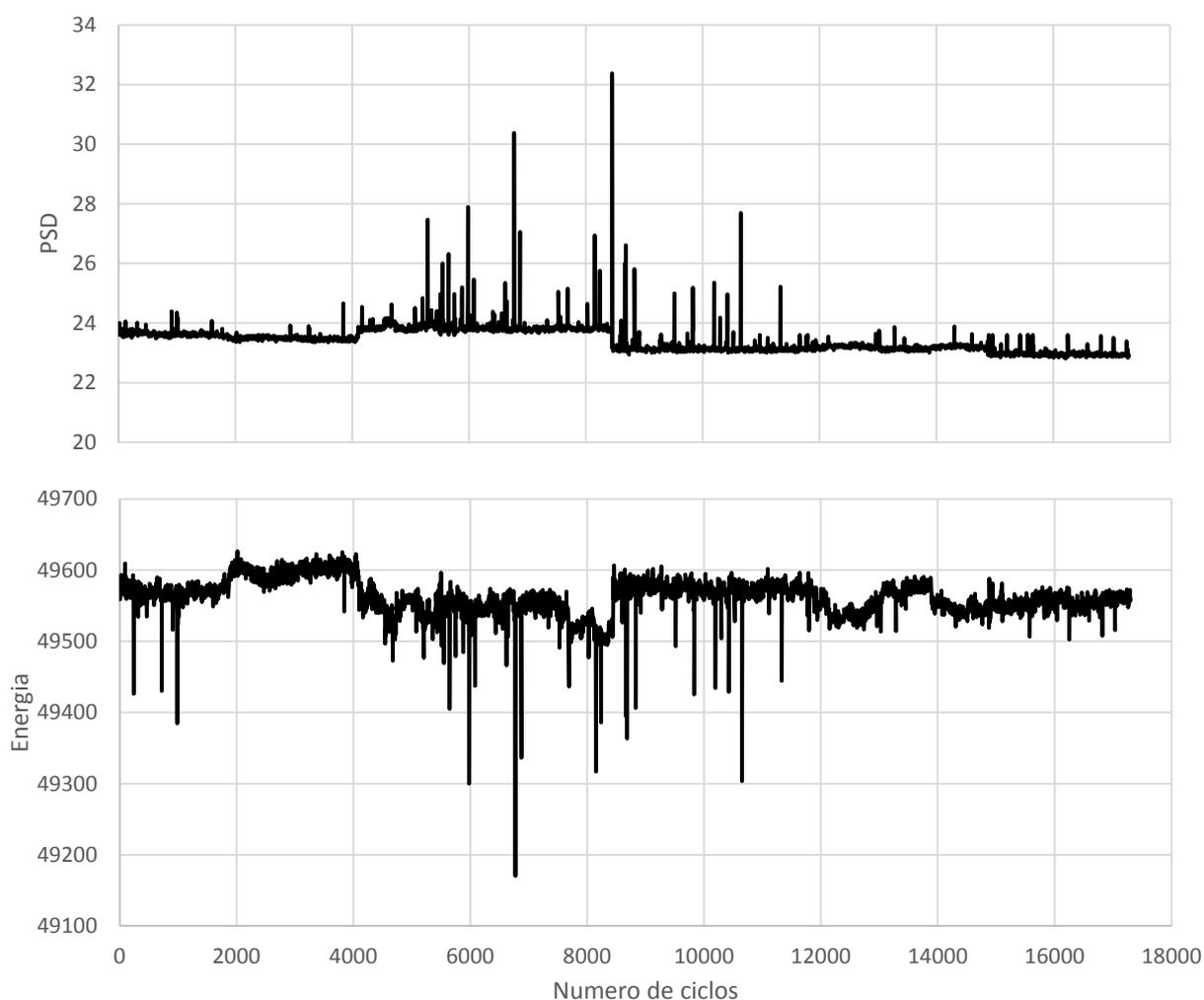
**Figura 90 – Dispersão dos dados estatísticos em velocidade alterada**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

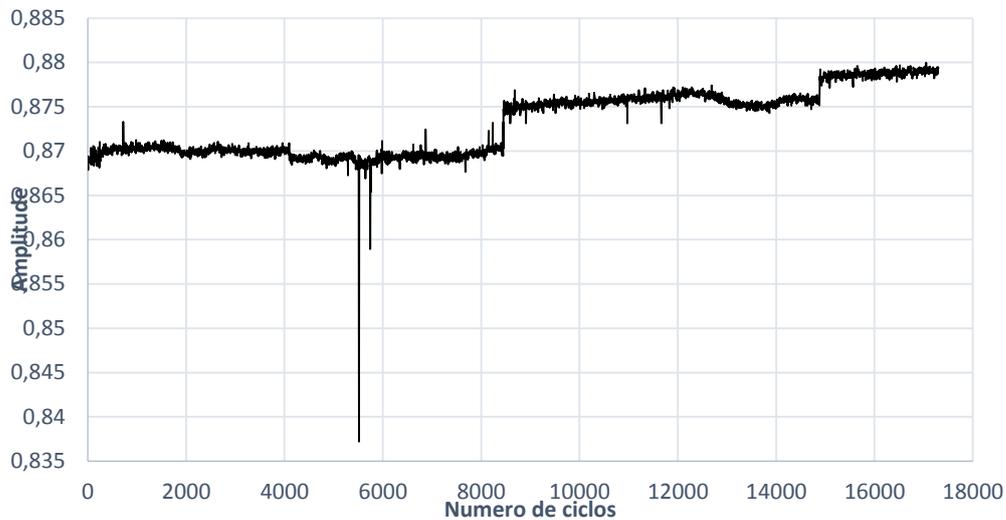
Considerando as técnicas de análise pela energia inerente ao sinal, observa-se um comportamento análogo ao apontado no teste de desgaste 04, também com 60 furos. Destaca-se uma alteração no patamar de concentração dos testes após 800 ciclos, provavelmente resultante de alguma mudança nos mecanismos envolvidos no contato

**Figura 91 - Dispersão dos dados de energia do sinal em velocidade alterada**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Apresenta-se , na Figura 92, a dispersão da Entropia Espectral na condição de velocidade alterada. Considerando a comparação com os testes na condição padrão, o comportamento a EE, em velocidades aumentada, acabou evoluindo para o mesmo patamar de concentração reportada, a diferença significativa entre os valores pode ser justificada pela sensibilidade da técnica ao aumento da velocidade e tempo de coleta.

**Figura 92 - Dispersão dos dados da EE do sinal em velocidade alterada**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

O tratamento do sinal resultou em um conjunto de pontos passíveis de análise, estes descritos na Tabela 10

**Tabela 10 – Pontos para análise na condição de velocidade alterada**

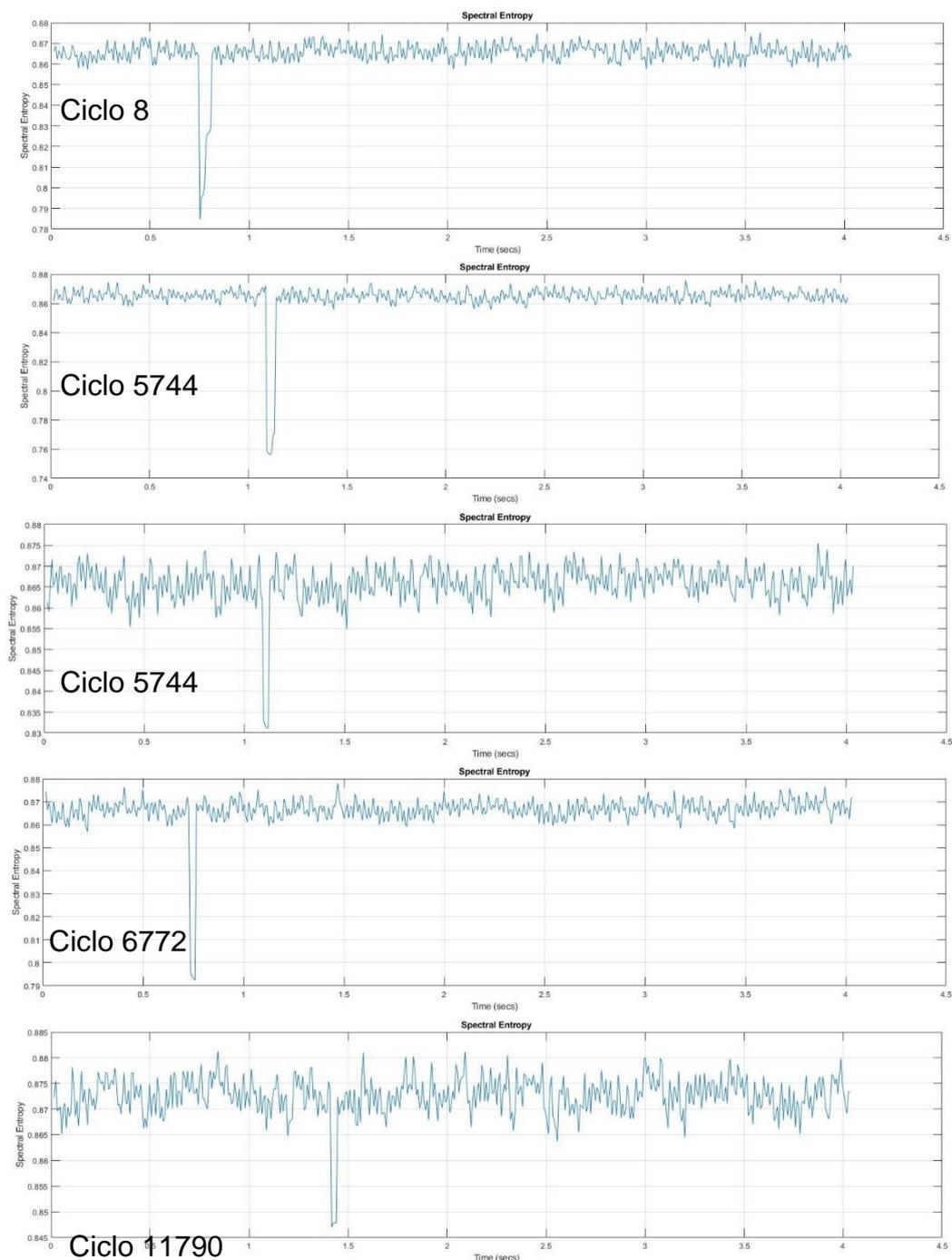
Teste em condição alterada	RMS	8,5292,5516,5652,5744,5752,5980,6772,8452,8592,8912,10976,11664,11796
	Kurtoses	8,240,720,984,1596,5516,5744,6772,8452,8592,8912,15436,15564
	Skewness	984,3844,4672,5204,5292,5516,5648,5652,5744,5980,6772,6872,7688,8452,8592,8600,8668,8676,8912,10424,10652,10976,11664,11772,11796,13024,15564
	PSD	8,240,720,984,5516,5652,5744,5752,8592,8912,10976,11664,11796,14896,14960,15212,15436,15564,15572,15652,16252
	Energia	8,5292,5516,5652,5744,5752,8452,8452,8592,8912,10976,11664,14896,14960,15212,15436,15564,15652
	Entropia espectral	8592,8912,10976,11664

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Categoriza-se os ciclos apontados para análise em duas categorias de acordo com o gráfico de Entropia Espectral. Cruzando as informações do ponto de coleta e o tempo com a velocidade de movimentação do conjunto, obtém-se o intervalo de

0,5 a 1,5 segundos do sinal como reportando a região de desgaste induzido ajustado para o caso. A Figura 93 apresenta o sinal de Emissão acústica processado de acordo com a EE no intervalo referente ao desgaste induzido, a interpretação cruzada com a STFT aponta uma provável propagação de trinca na região.

**Figura 93 - Entropia Espectral no ponto de desgaste induzido**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Os ciclos 8, 270, 5292, 5652, 5744, 5980, 6772, 6872 e 11790 apontaram de acordo com a EE falhas definidas como propagação de trinca de acordo com a interpretação conjunta entre EE e STFT. Os demais ciclos apontaram falhas em regiões fora da condição induzida, dificultando sua associação ao parâmetro testado, embora acredite-se na propagação de trinca na região em que o contato aconteceu.

## 5. CONCLUSÃO

Considerando o volume de sinais resultantes das nove coletas em uma mesma condição somada a movimentação em velocidade aumenta, seria inviável a interpretação individual de cada coleta. Sendo assim, o método selecionado como filtro, pautado no critério de Chauvenet, proporcionou uma alternativa de interpretação após todos os cálculos inerentes ao sinal. Destaca-se ainda a assertividade do filtro, já que todos os casos apontados indicaram algum tipo de evento significativo.

Tratando da emulação das condições de desgaste e falha seguiu-se as metodologias previamente estudadas. Tratando da avaliação do desgaste, a redução da área de contato alterou o sinal de EA, embora não conforme descrito nos estudos apontados, condição semelhante para as trincas, mas estas apontando um número maior de eventos.

Tratando do RMS das condições analisadas, as dispersões não apresentaram a linearidade apontada nos estudos considerados como base teórica, entretanto reportou-se uma variação significativa que poderia validar a técnica como um mecanismo de acompanhamento da evolução da condição analisada. Esta ponderação é muito mais sensível nas dispersões relacionadas ao desgaste, em que o número de indicações manteve-se elevada em divergência as trincas emuladas,

Ao se avaliar a sensibilidade dos sinais processando por Curtoses, Skewness, PSD e potência de banda não se observou variação significativa nos casos analisados quando comparados aos dados de RMS. Embora a Skewness

Isolando a técnica da Entropia Espectral do ponto de vista numérico, os testes em velocidades de movimentação em mesma condição reportaram notável relação entre a evolução das condições emuladas com a variação do valor de EE, gerando para a condição um maior número de pontos para interpretação. Entretanto, quando se variou os parâmetros de movimentação do conjunto, a EE não manteve a mesma relação encontrada nos testes anteriores, gerando assim um número muito inferior ao esperado. Justifica-se esta anomalia pelo fracionamento da interpretação em intervalos de 12 horas para a condição, caso esta não ocorresse todos os dados acima de 8000 ciclos seriam considerados discrepantes pelo aumento no patamar de concentração dos valores devido a progressão do desgaste.

Embora a avaliação puramente numérica indica-se uma provável falha, a interpretação gráfica da EE resultou em um diagnóstico relativamente preciso quando a incidência de uma provável falha e o instante em que a mesma veio a ocorrer, entretanto a técnica não foi capaz, de maneira isolada, de registrar a natureza do fenômeno registrado. A adição da STFT mostrou-se eficiente quanto a capacidade não só de reportar mas também de gerar um diagnóstico da característica da falha, sendo essa uma trinca eclodindo ou a evolução do desgaste.

Aponta-se então como alternativa viável ao diagnóstico de um conjunto pinhão cremalheira a coleta dos sinais de EA resultantes da interação e o tratamento pela combinação de dados de RMS, Skewness e Entropia Espectral, o que resultaria em uma cobertura eficiente dos casos a serem destacados seguindo os critérios estabelecidos. Aponta-se, conforme já descrito, a eficiência da combinação das técnicas de EE e STFT quando se fizer necessário um diagnóstico das razões da incidência da falha

### **5.1. Sugestão para trabalhos futuros**

- Variação das geometrias para verificação da influência no sinal de EA;
- Alteração nos materiais do par engrenado gerando mecanismos e interações divergentes;
- Estudo abrangente das velocidades de movimentação;

## REFERÊNCIAS

BARANOV, V. M.; KUDRYAVTSEV, E.; SARYCHEV, G.; SCHAVELIN, V. **Acoustic emission in friction**. 2007.

BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology, Second Edition**. 2013.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8<sup>o</sup> ed. 2009.

BUJ-CORRAL, I.; ÁLVAREZ-FLÓREZ, J.; DOMÍNGUEZ-FERNÁNDEZ, A. Acoustic emission analysis for the detection of appropriate cutting operations in honing processes. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 99, p. 873–885, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.06.039>>. .

CHAARI, F.; FAKHFAKH, T.; HADDAR, M. Analytical modelling of spur gear tooth crack and influence on gearmesh stiffness. **European Journal of Mechanics, A/Solids**, v. 28, n. 3, p. 461–468, 2009. Elsevier Masson SAS. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.euromechsol.2008.07.007>>. .

CHAI, M.; ZHANG, Z.; DUAN, Q. A new qualitative acoustic emission parameter based on Shannon ' s entropy for damage monitoring. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 100, p. 617–629, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.08.007>>. .

CHEN, Z.; SHAO, Y. Dynamic simulation of spur gear with tooth root crack propagating along tooth width and crack depth. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 8, p. 2149–2164, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.07.006>>. .

CURÀ, F.; MURA, A.; ROSSO, C. Investigation of crack propagation path in tube gears. **Procedia Structural Integrity**, v. 7, p. 476–483, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321617304717>>. .

DIAS, E. A.; PEREIRA, F. B.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; BRANDÃO, L. C. Monitoring of through-feed centreless grinding processes with acoustic emission signals. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 94, p. 71–79, 2016.

GÓMEZ, M. P.; HEY, A. M.; D'ATTELIS, C. E.; RUZZANTE, J. E. Assessment of Cutting Tool Condition by Acoustic Emission. **Procedia Materials Science**, v. 1, p. 321–328, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211812812000442>> .

HAO, Q.; ZHANG, X.; WANG, Y.; SHEN, Y.; MAKIS, V. A novel rail defect detection method based on undecimated lifting wavelet packet transform and Shannon entropy-improved adaptive line enhancer. **Journal of Sound and Vibration**, v. 425, p. 208–220, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.04.003>> .

HASE, A.; MISHINA, H.; WADA, M. Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. **Wear**, v. 292–293, p. 144–150, 2012. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.019>> .

JAKITSCH, B. D. O. ANÁLISE DE DESEMPENHO DE BROCAS REVESTIDAS E COM REFRIGERAÇÃO INTERNA NA USINAGEM DO AÇO SAE-8620. , v. d, n. 2005, 2006.

JEMIELNIAK, K.; OTMAN, O. Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals. , v. 76, p. 192–197, 1998.

JUVINALL, R. C. **Fundamentals of Machine Component design**. 2012.

KATTELUS, J.; MIETTINEN, J.; LEHTOVAARA, A. Detection of gear pitting failure progression with on-line particle monitoring. **Tribology International**, , n. September 2016, p. 1–7, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.02.045>> .

LIANG, X.; ZHANG, H.; LIU, L.; ZUO, M. J. The influence of tooth pitting on the mesh stiffness of a pair of external spur gears. **Mechanism and Machine Theory**, v. 106, p. 1–15, 2016. Elsevier. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.08.005>>. .

LIANG, X.; ZHANG, H.; ZUO, M. J.; QIN, Y. Three new models for evaluation of standard involute spur gear mesh stiffness. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 101, p. 424–434, 2018.

LIANG, X.; ZUO, M. J.; FENG, Z. Dynamic modeling of gearbox faults : A review. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 98, p. 852–876, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.024>>. .

LUO, Y.; BADDOUR, N.; LIANG, M. Dynamical modeling and experimental validation for tooth pitting and spalling in spur gears. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 119, p. 155–181, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.09.027>>. .

MAIA, L. H. A.; ABRAO, A. M.; VASCONCELOS, W. L.; SALES, W. F.; MACHADO, A. R. A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission. **Tribology International**, v. 92, p. 519–532, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.024>>. .

MCLASKEY, G. C.; GLASER, S. D.; GROSSE, C. U. Beamforming array techniques for acoustic emission monitoring of large concrete structures. **Journal of Sound and Vibration**, 2010.

MORALES-ESPEJEL, G. E.; RYCERZ, P.; KADIRIC, A. Prediction of micropitting damage in gear teeth contacts considering the concurrent effects of surface fatigue and mild wear. **Wear**, v. 398–399, n. June 2017, p. 99–115, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.11.016>>. .

PASCOE, J. A.; ZAROUCAS, D. S.; ALDERLIESTEN, R. C.; BENEDICTUS, R.

Using acoustic emission to understand fatigue crack growth within a single load cycle. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 194, n. February, p. 281–300, 2018. Elsevier. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.03.012>>. .

QIN, W. J.; GUAN, C. Y. An investigation of contact stresses and crack initiation in spur gears based on finite element dynamics analysis. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 83, p. 96–103, 2014. Elsevier. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.03.035>>. .

SÁNCHEZ, R.; CERRADA, M. A comparative feature analysis for gear pitting level classification by using acoustic emission, vibration and current signals. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 24, p. 346–352, 2018. Elsevier B.V. Disponible em: <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.600>>. .

SHARMA, R. B.; PAREY, A. Modelling of acoustic emission generated by crack propagation in spur gear. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 182, p. 215–228, 2017. Elsevier Ltd. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.07.030>>. .

SHARMA, R. B.; PAREY, A.; TANDON, N. Modelling of acoustic emission generated in involute spur gear pair. **Journal of Sound and Vibration**, 2017a.

SHARMA, R. B.; PAREY, A.; TANDON, N. Modelling of acoustic emission generated in involute spur gear pair. **Journal of Sound and Vibration**, v. 393, p. 353–373, 2017b. Elsevier Ltd. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2017.01.010>>. .

TAN, C. K.; IRVING, P.; MBA, D. A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 21, n. 1, p. 208–233, 2007.

WANG, Y.; XIANG, J.; MARKERT, R.; LIANG, M. Spectral kurtosis for fault detection, diagnosis and prognostics of rotating machines: A review with applications. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 66–67, p. 679–698, 2016.

Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.04.039>>. .

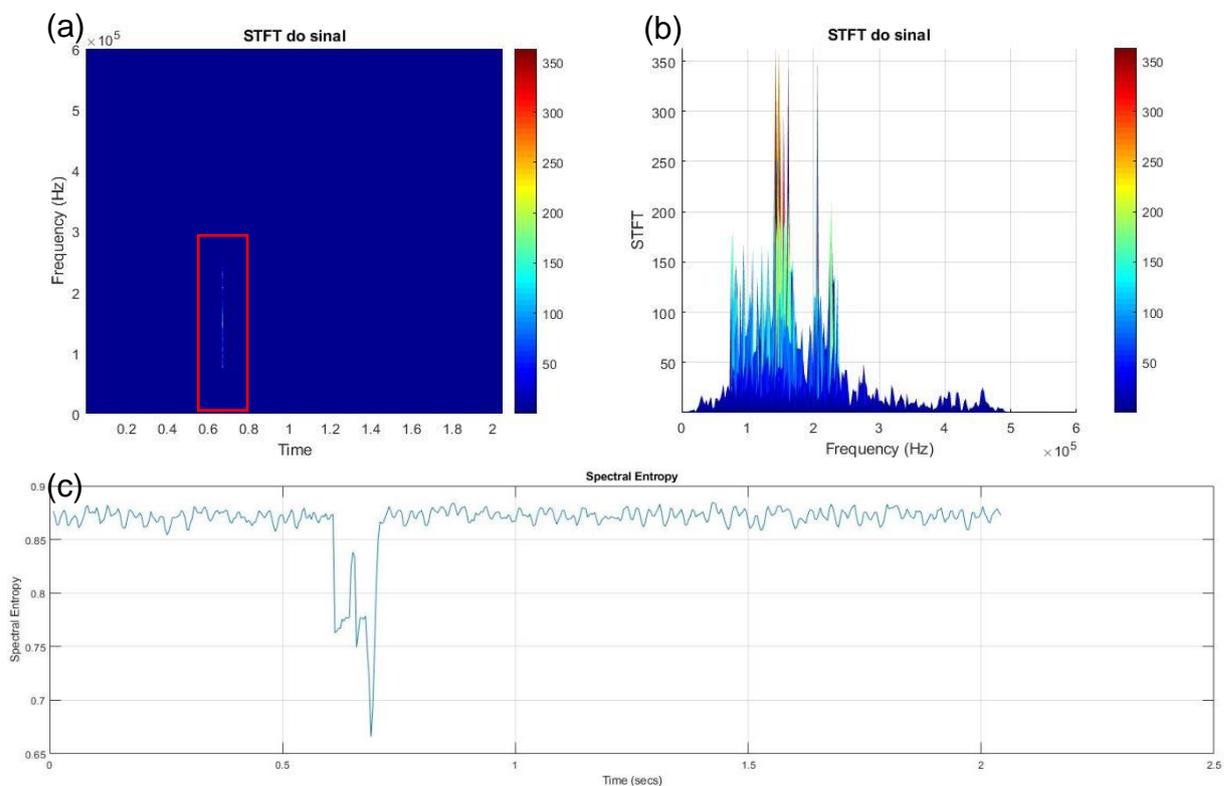
ZHANG, X.; FENG, N.; WANG, Y.; SHEN, Y. Acoustic emission detection of rail defect based on wavelet transform and Shannon entropy. **Journal of Sound and Vibration**, v. 339, p. 419–432, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2014.11.021>>. .

ZHANG, Y.; LU, W.; CHU, F. Planet gear fault localization for wind turbine gearbox using acoustic emission signals. **Renewable Energy**, 2017.



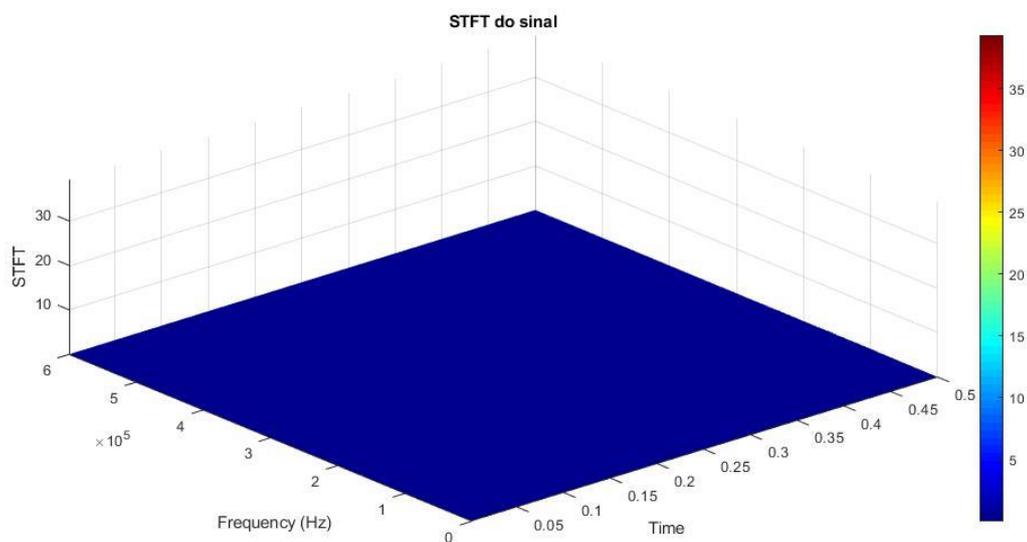
## APÊNDICE A- Complemento das análises da condição de controle

Figura 94 - Análise do sinal de EA no 21º ciclo



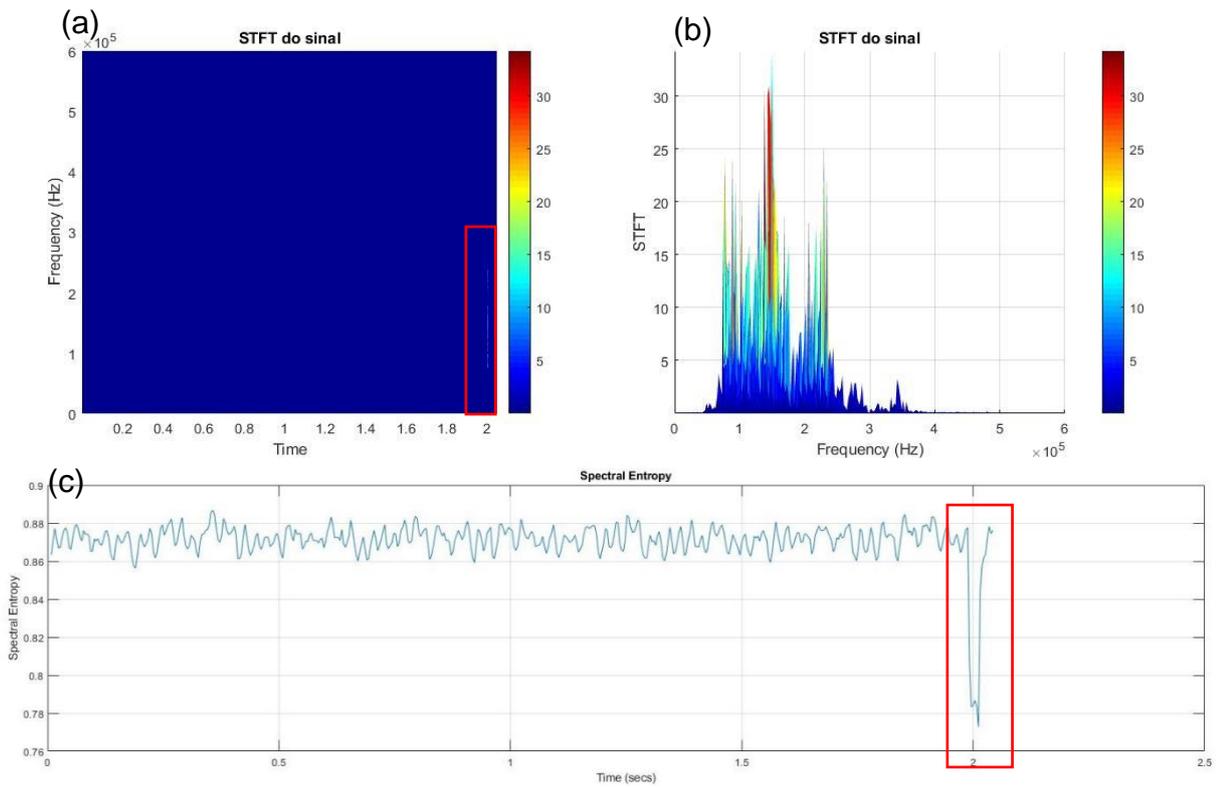
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 95 - Análise do sinal de EA no 54º ciclo



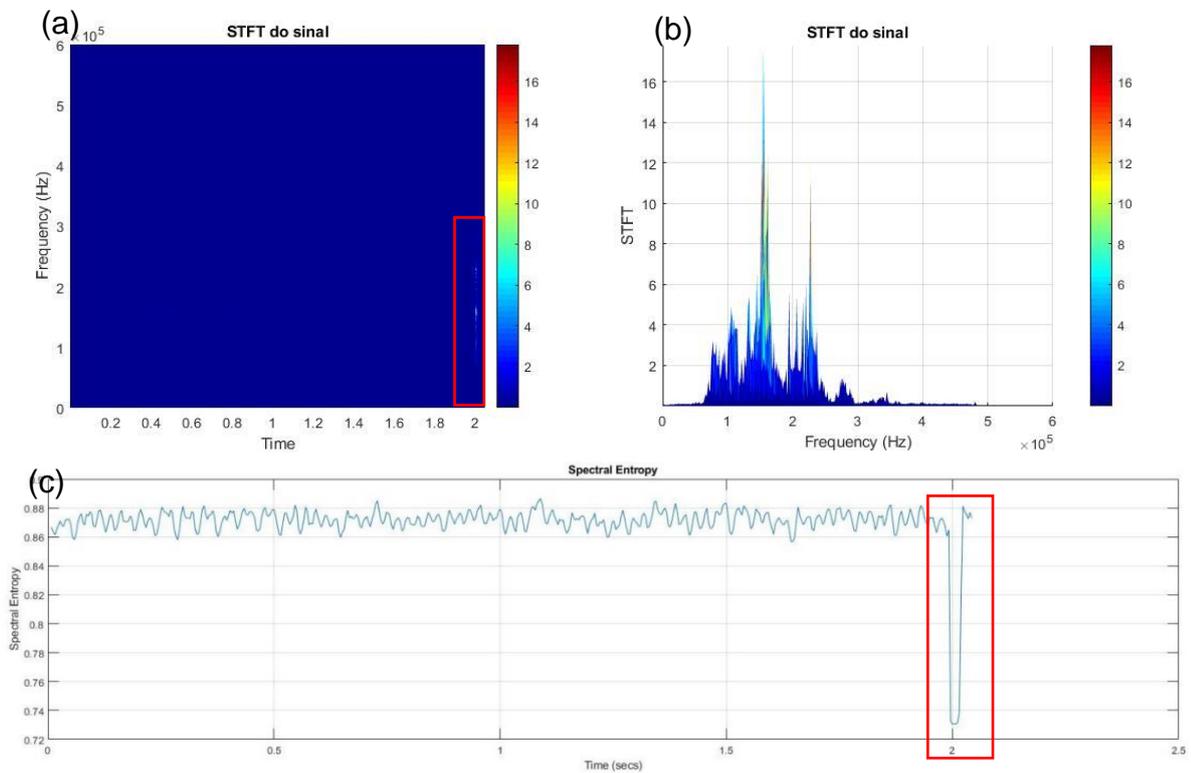
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 96 – Análise do sinal de EA no 112° ciclo**



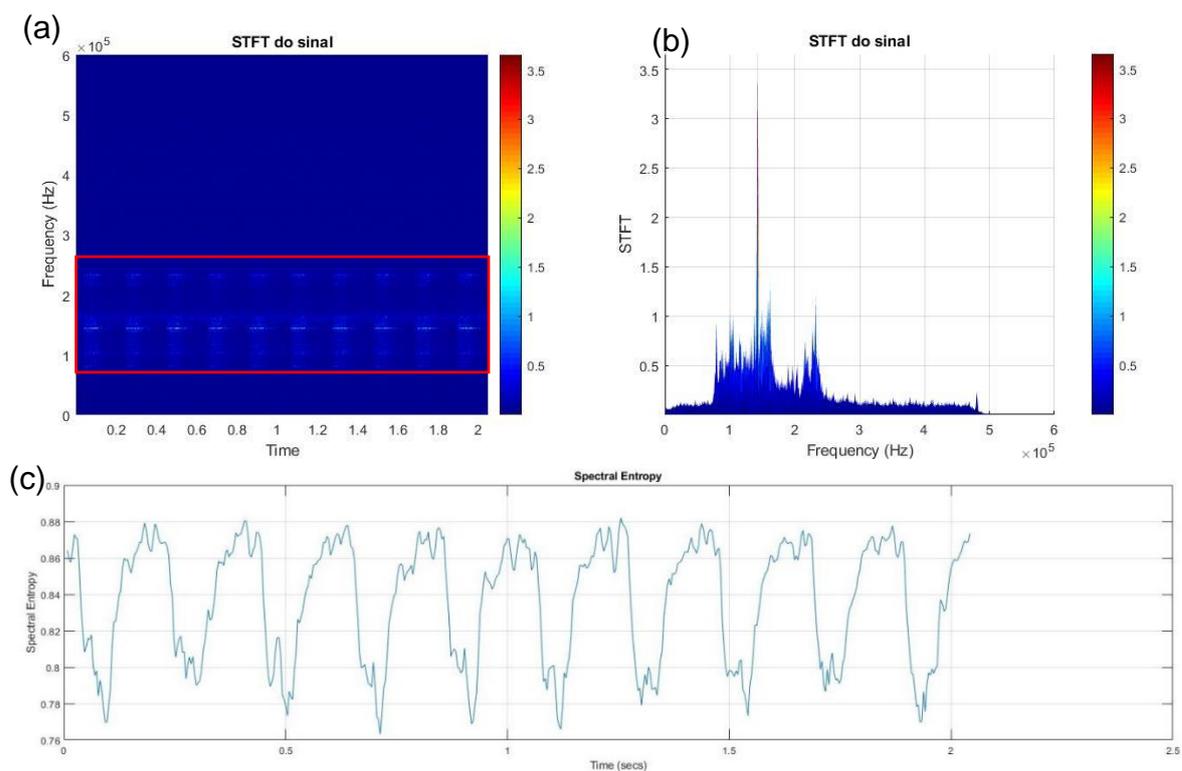
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 97 – Análise do sinal de EA no 423° ciclo**



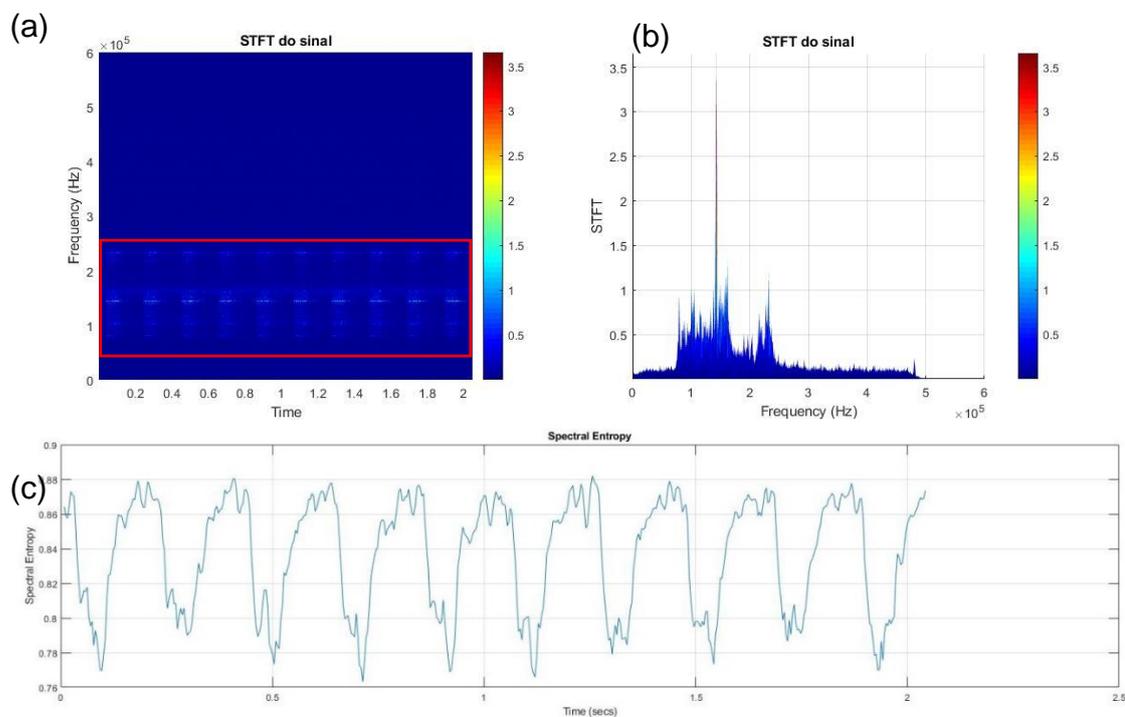
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 98 – Análise do sinal de EA no 647º ciclo**



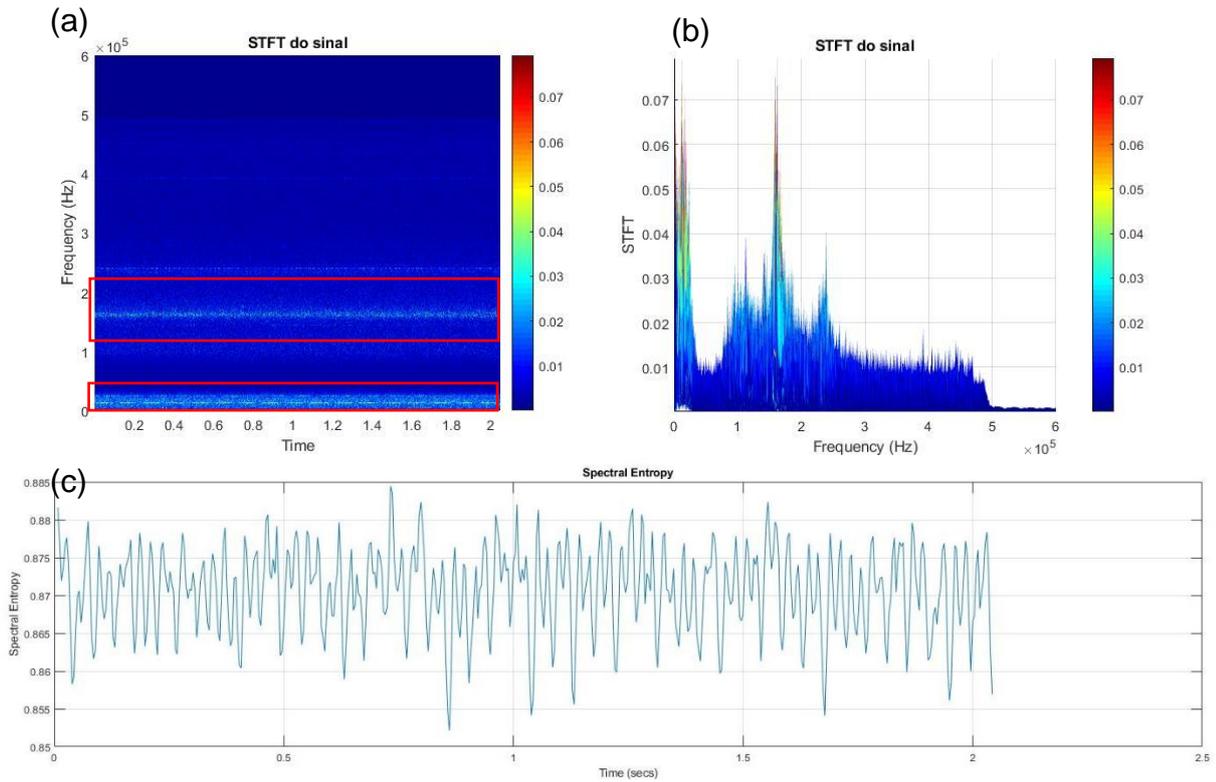
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 99 – Análise do sinal de EA no 648º ciclo**



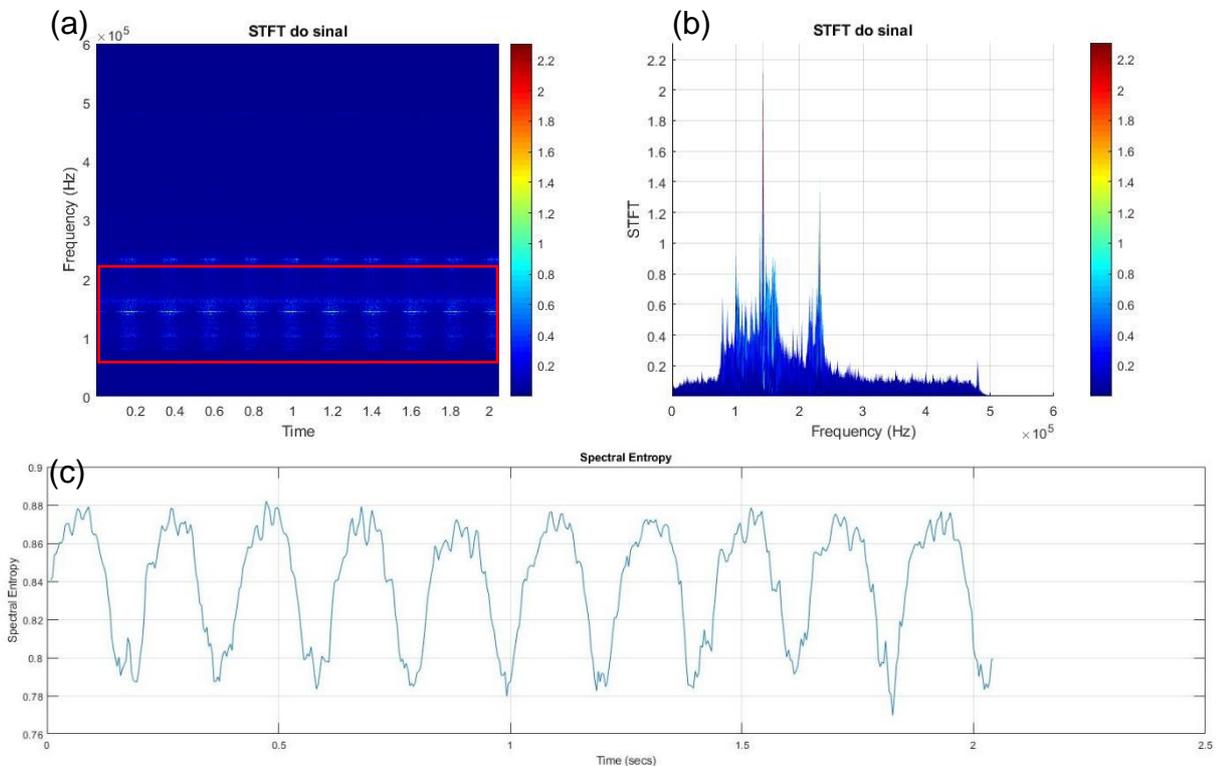
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 100 – Análise do sinal de EA no 649º ciclo**



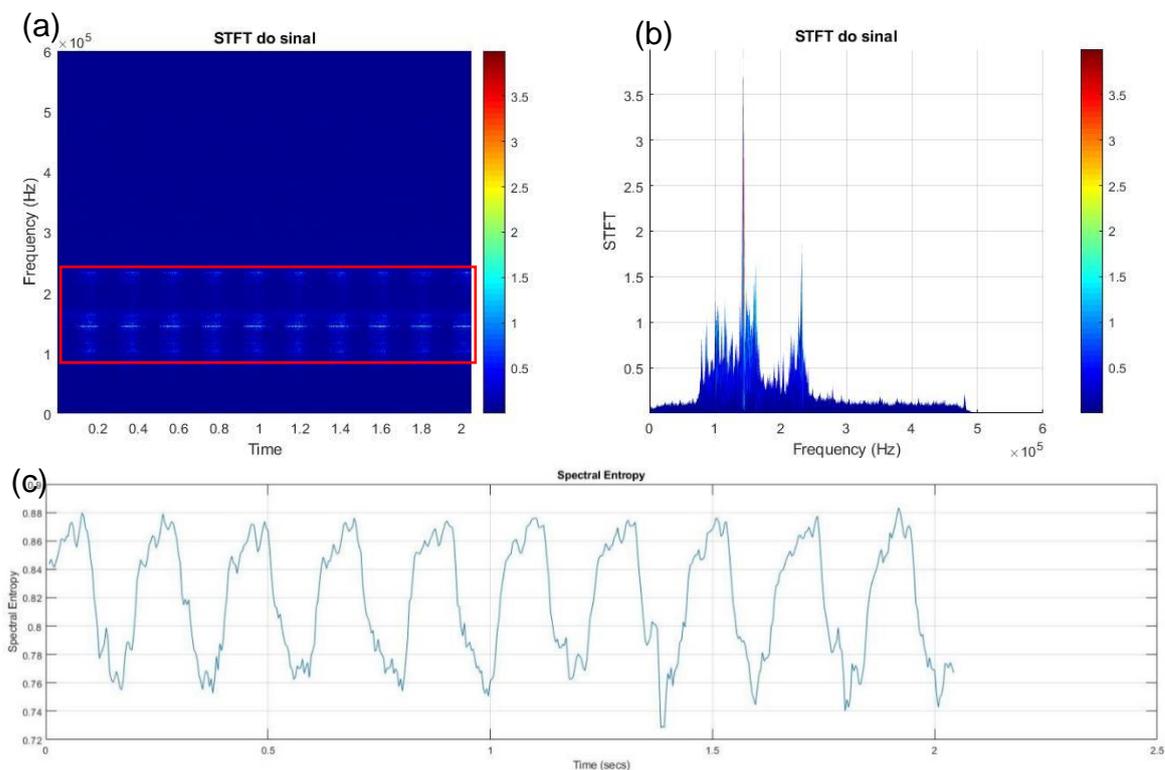
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 101 – Análise do sinal de EA no 650º ciclo**



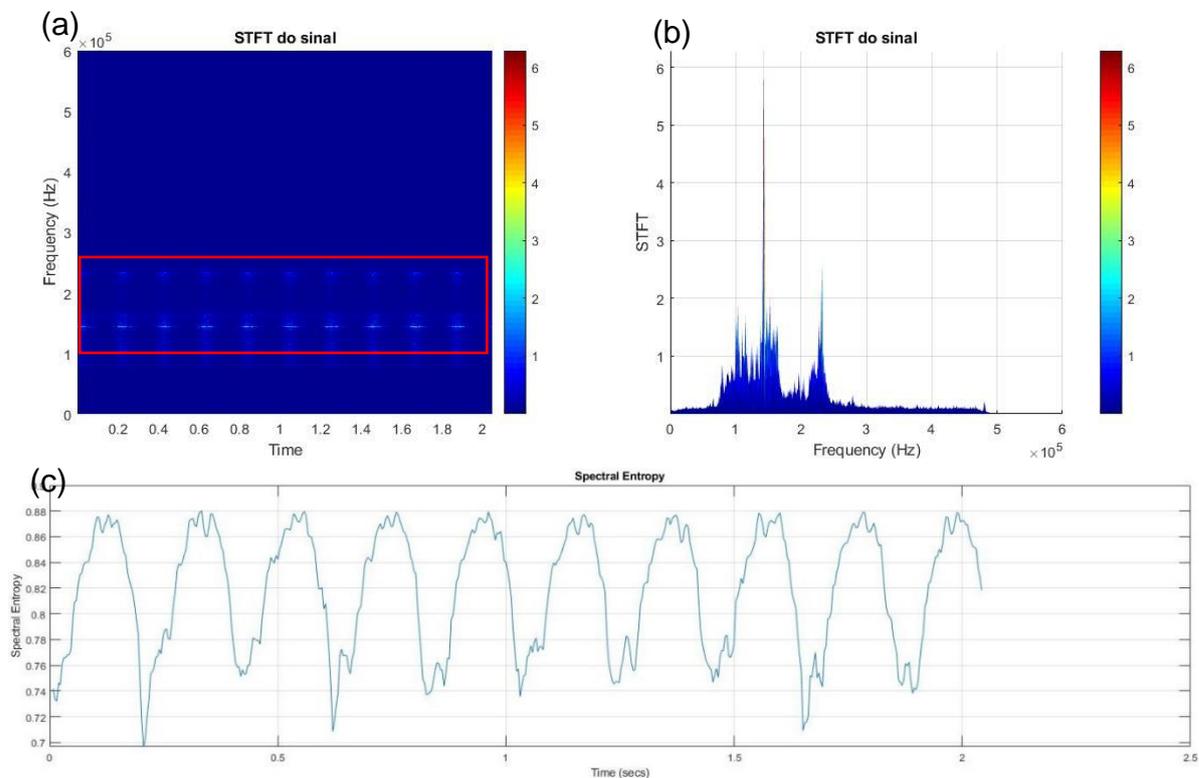
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 102 – Análise do sinal de EA no 651° ciclo**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

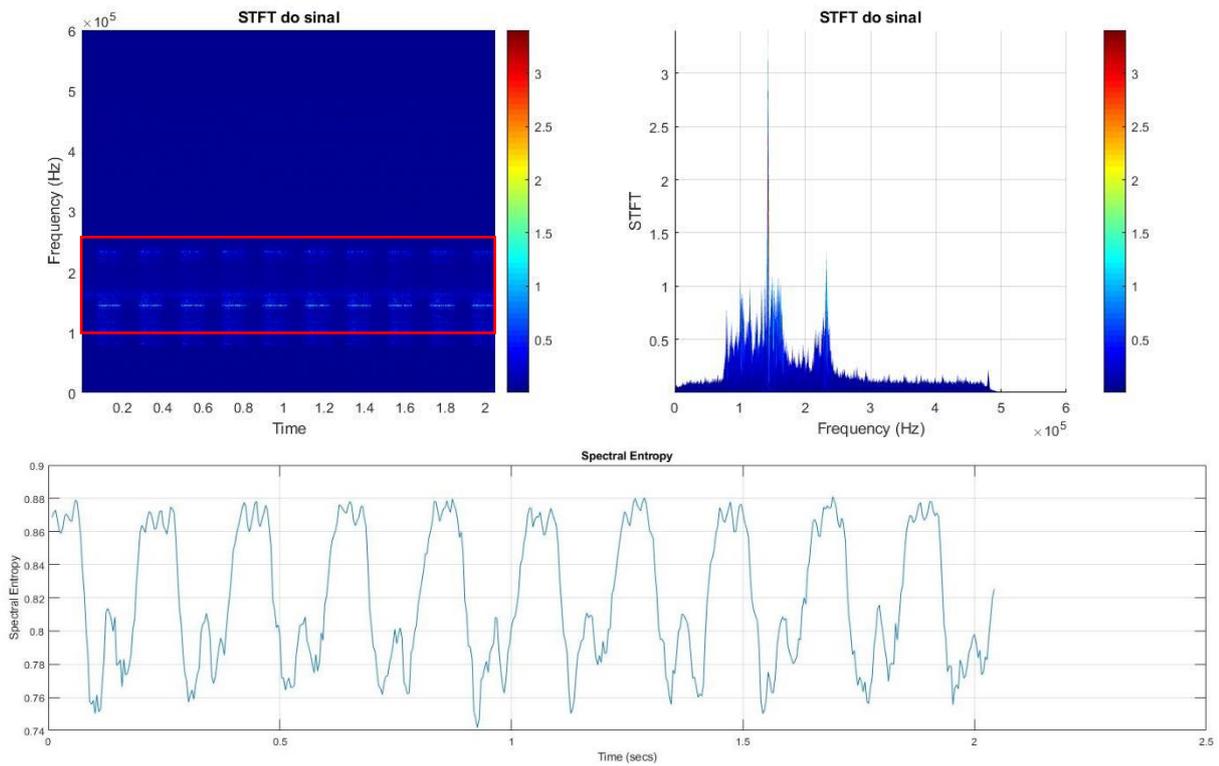
**Figura 103 – Análise do sinal de EA no 654° ciclo**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 104 - Análise do sinal de EA no 659° ciclo**

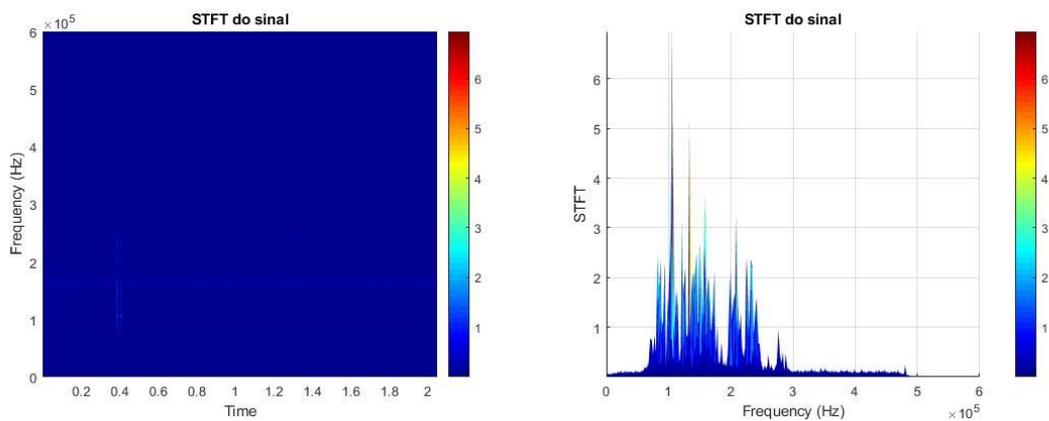
(a) (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

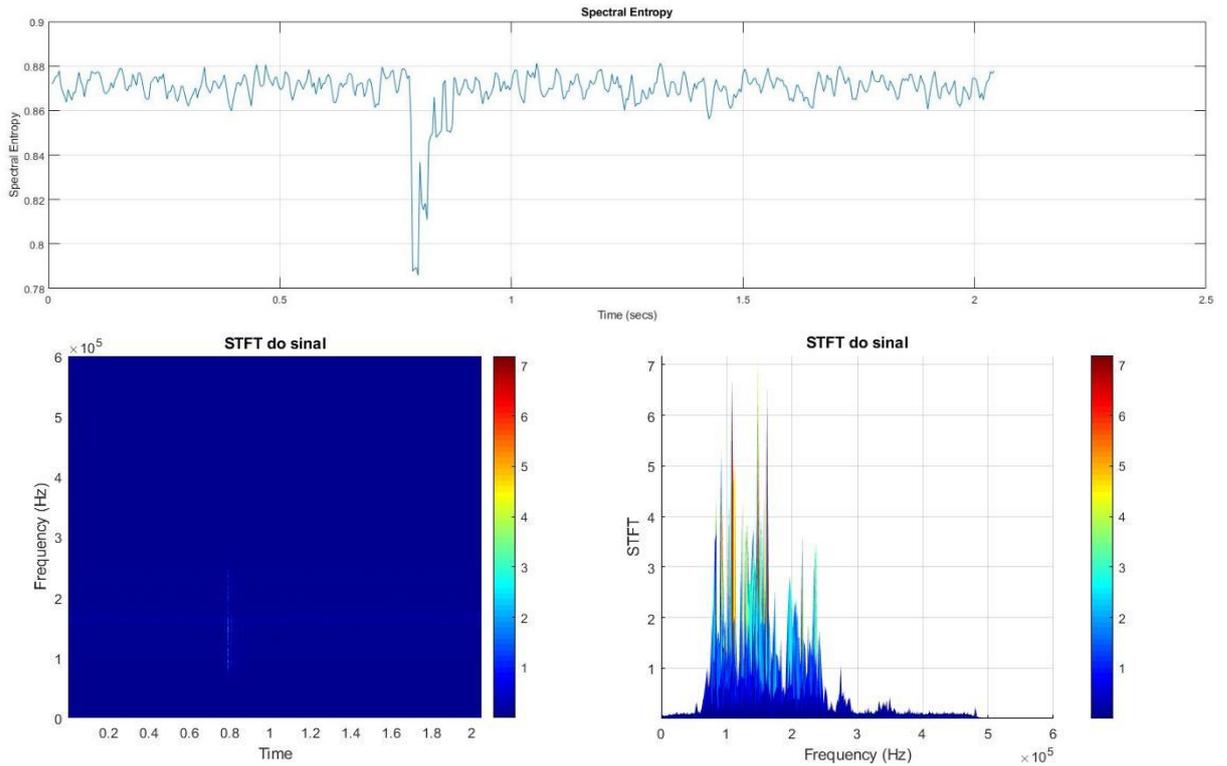
## APÊNDICE B – Complemento das análises da condição de Defeito 01

Figura 105 – Análise do sinal no ponto 28 – Defeito 01



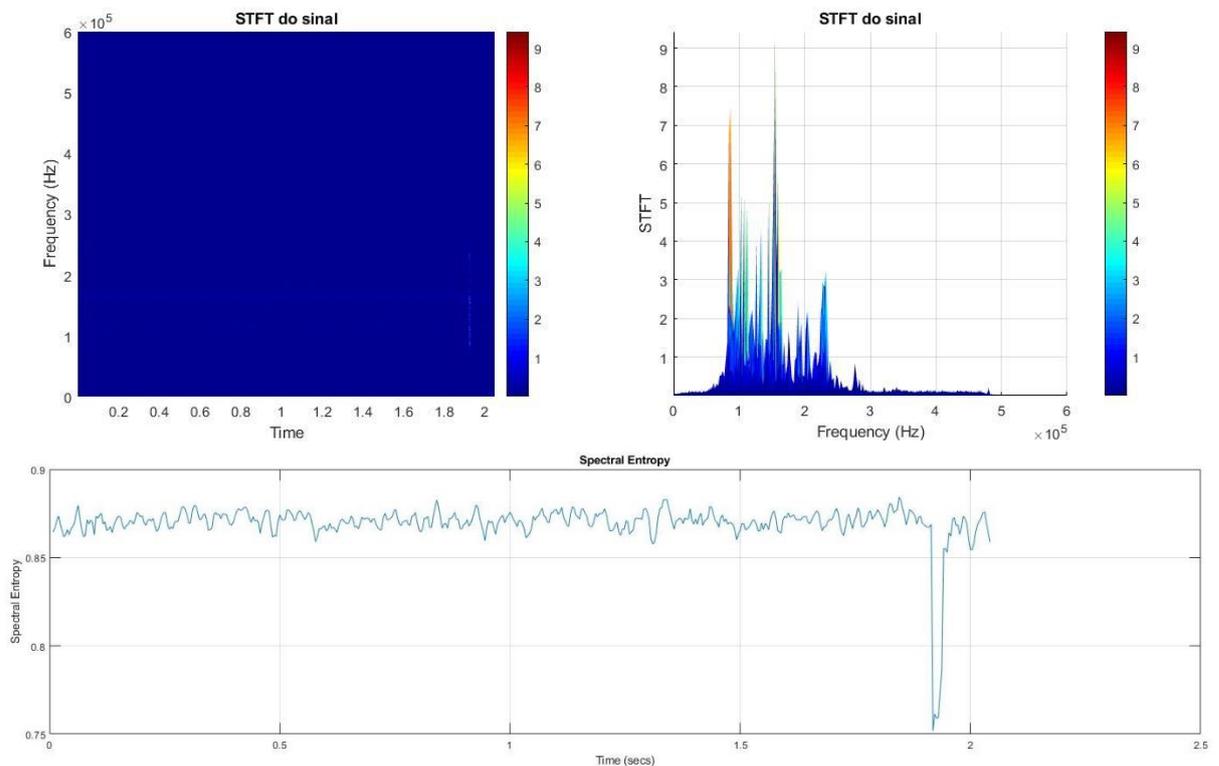
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 106 – Análise do sinal no ponto 202 – Defeito 01



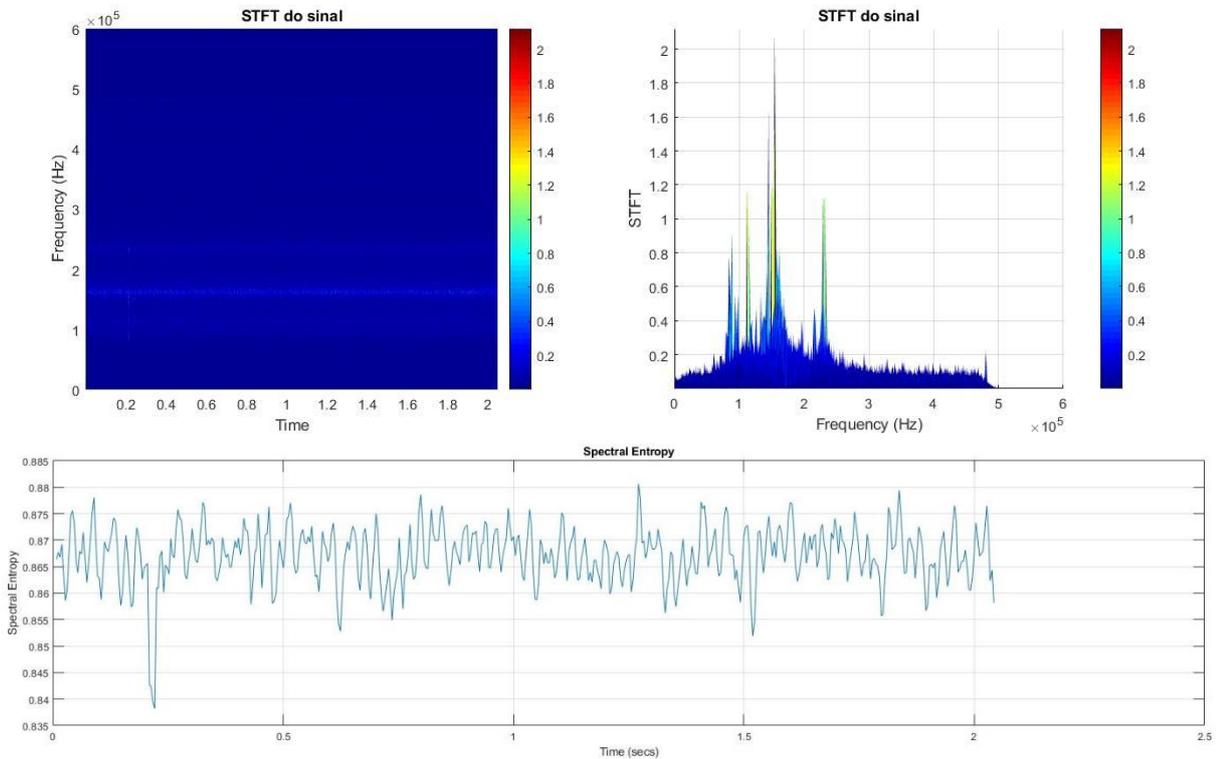
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 107 – Análise do sinal no ponto 270 – Defeito 01



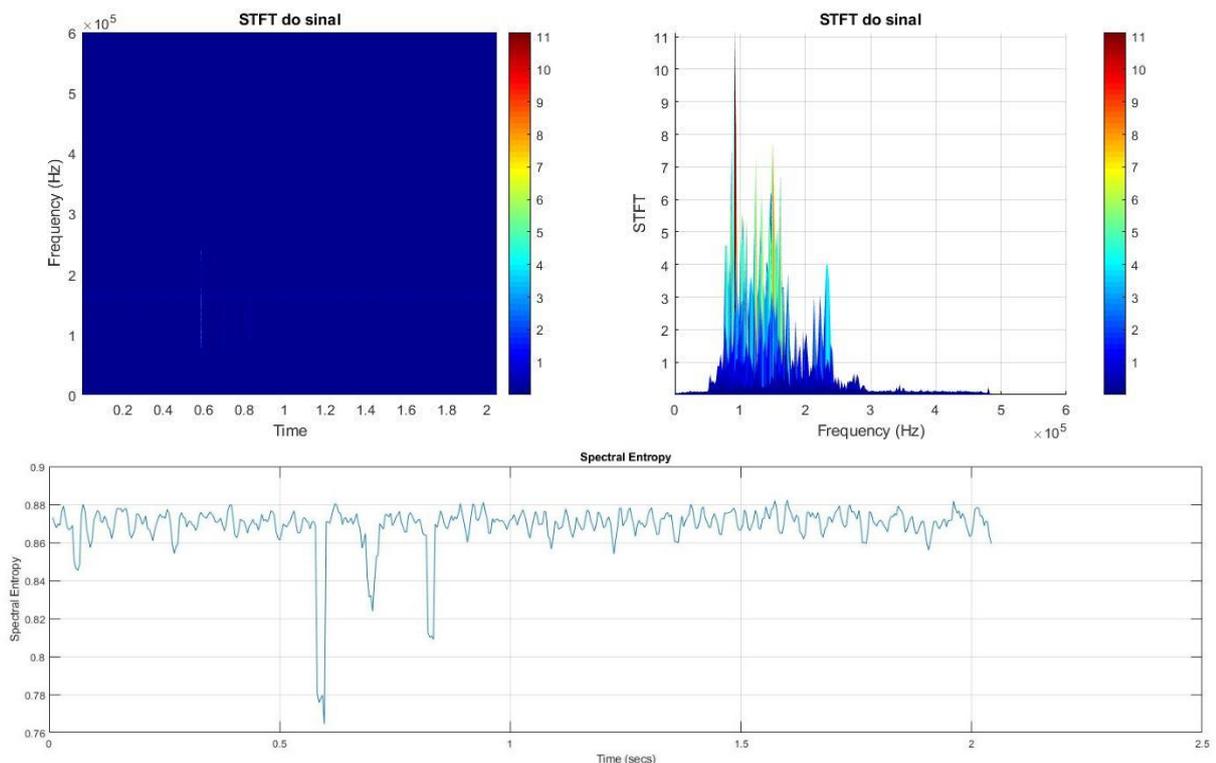
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 108 – Análise do sinal no ponto 331 – Defeito 01**



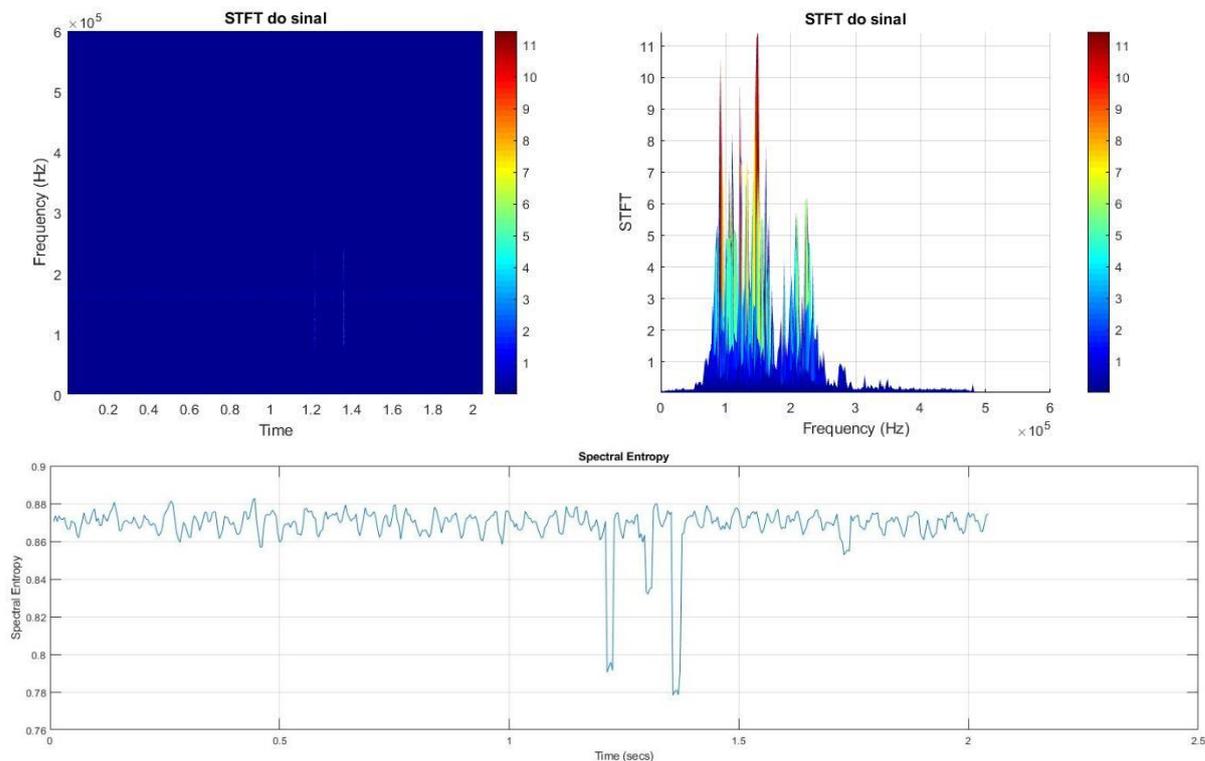
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 109 – Análise do sinal no ponto 362 – Defeito 01**



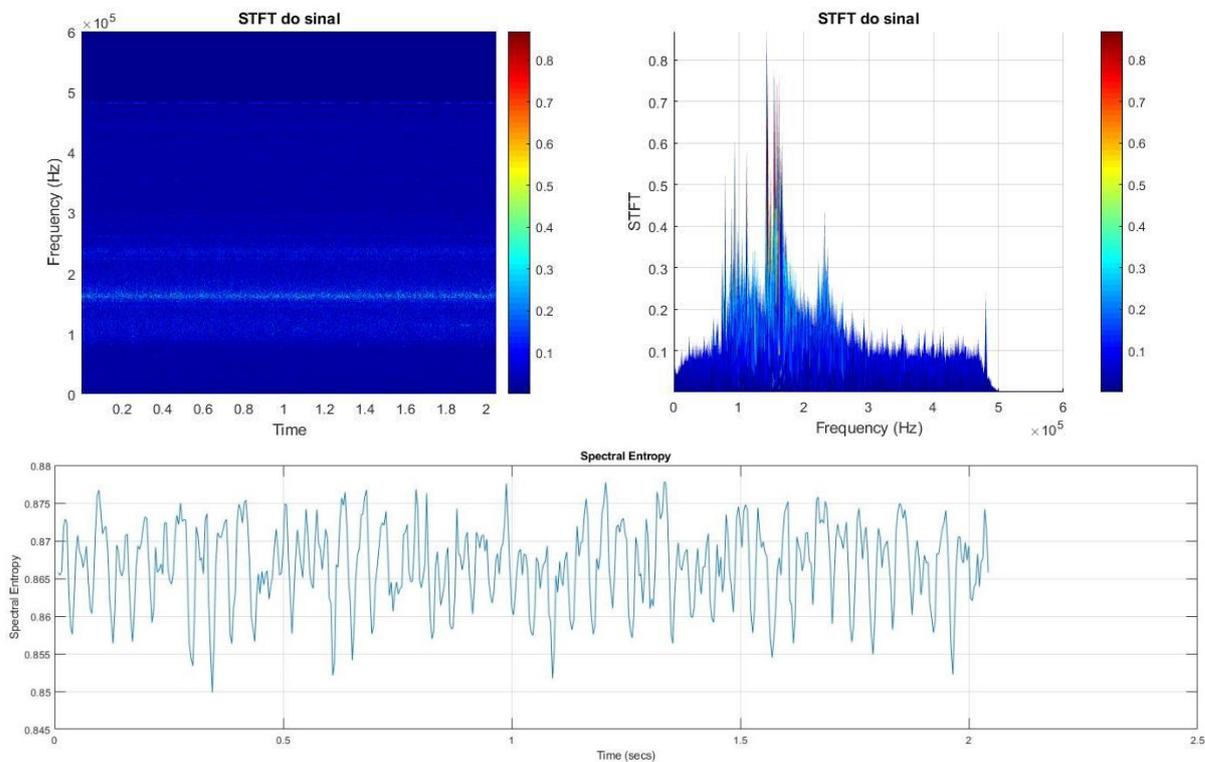
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 110 – Análise do sinal no ponto 371 – Defeito 01**



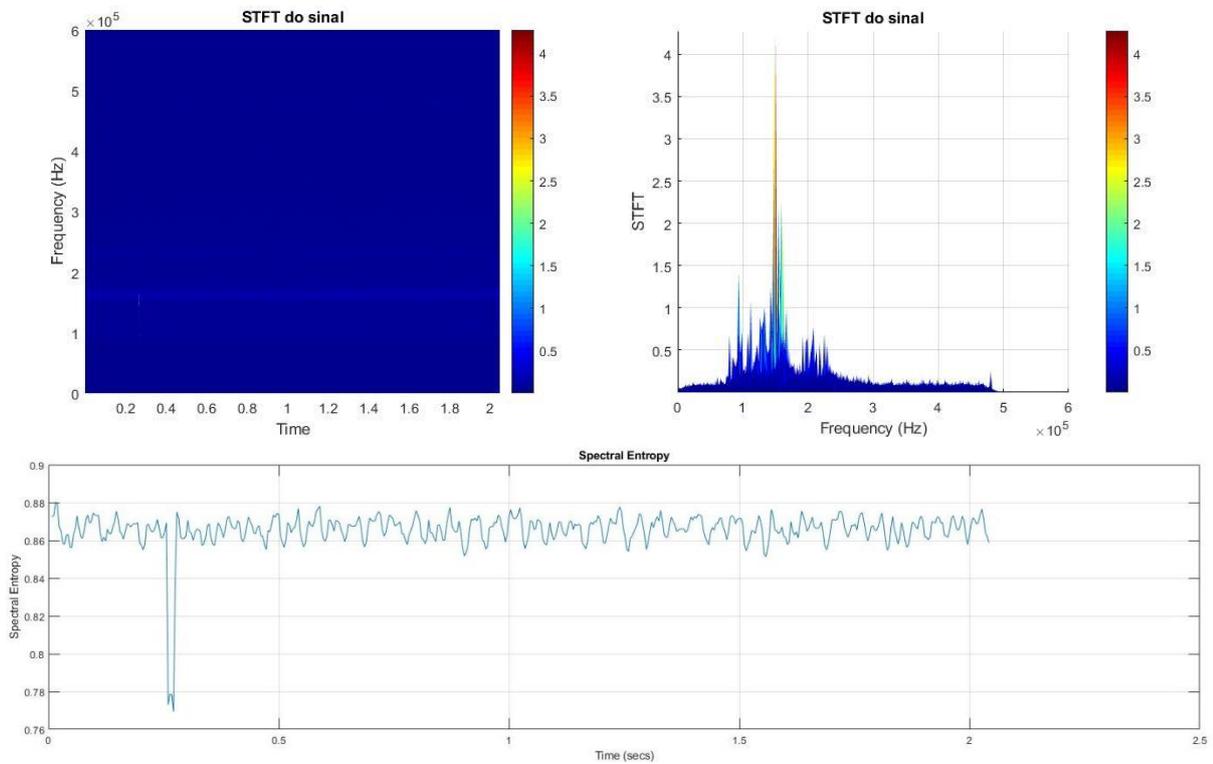
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 111 – Análise do sinal no ponto 380 – Defeito 01**



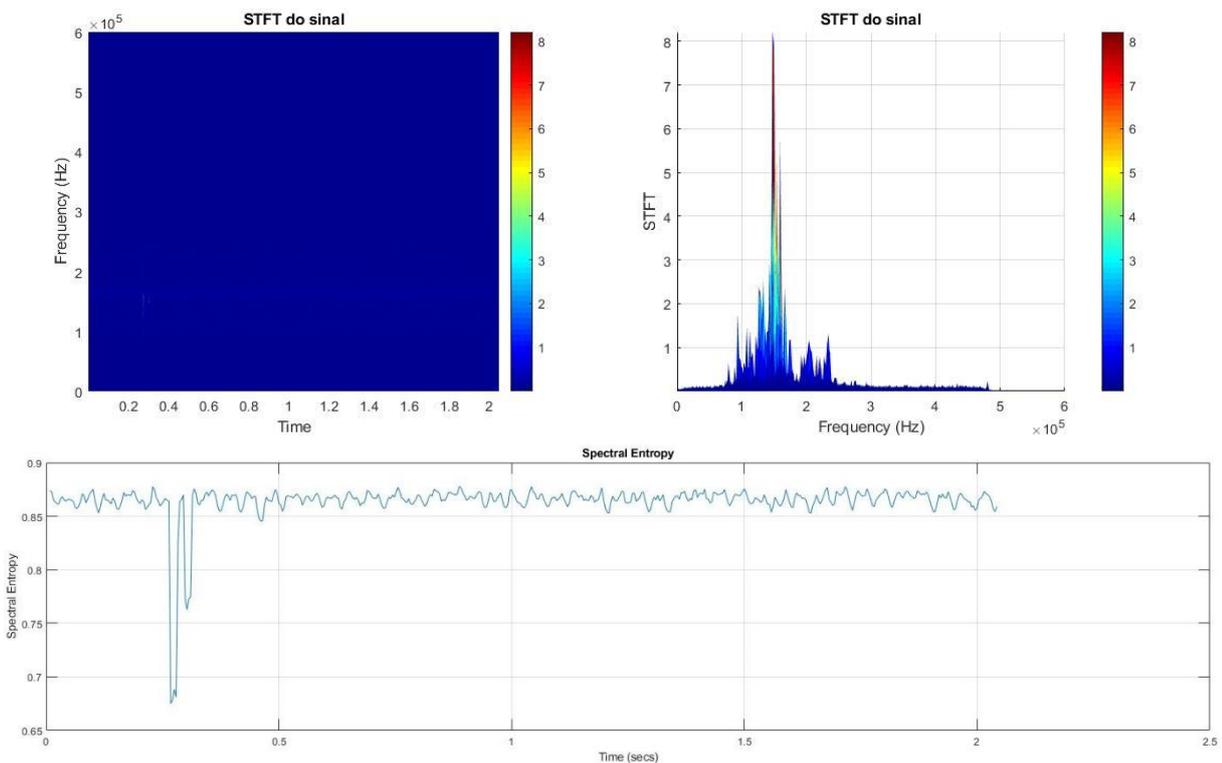
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 112 – Análise do sinal no ponto 385 – Defeito 01**



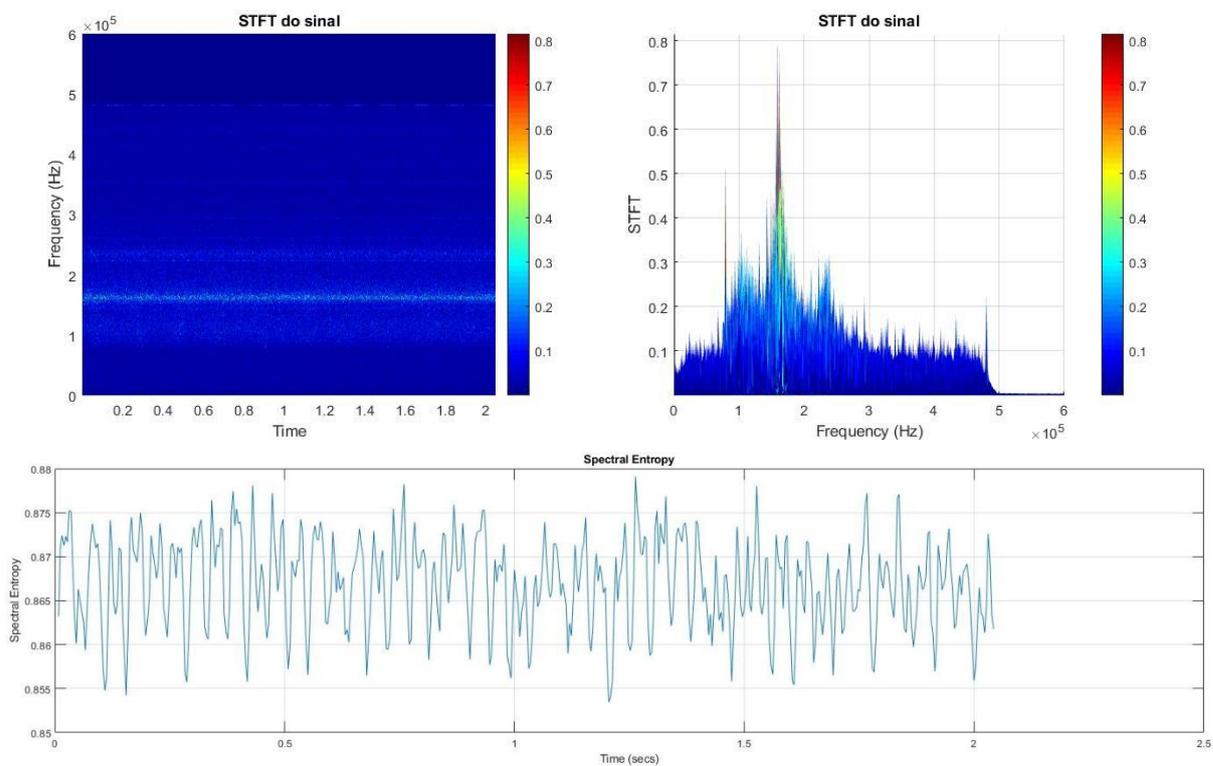
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 113 – Análise do sinal no ponto 387 – Defeito 01**



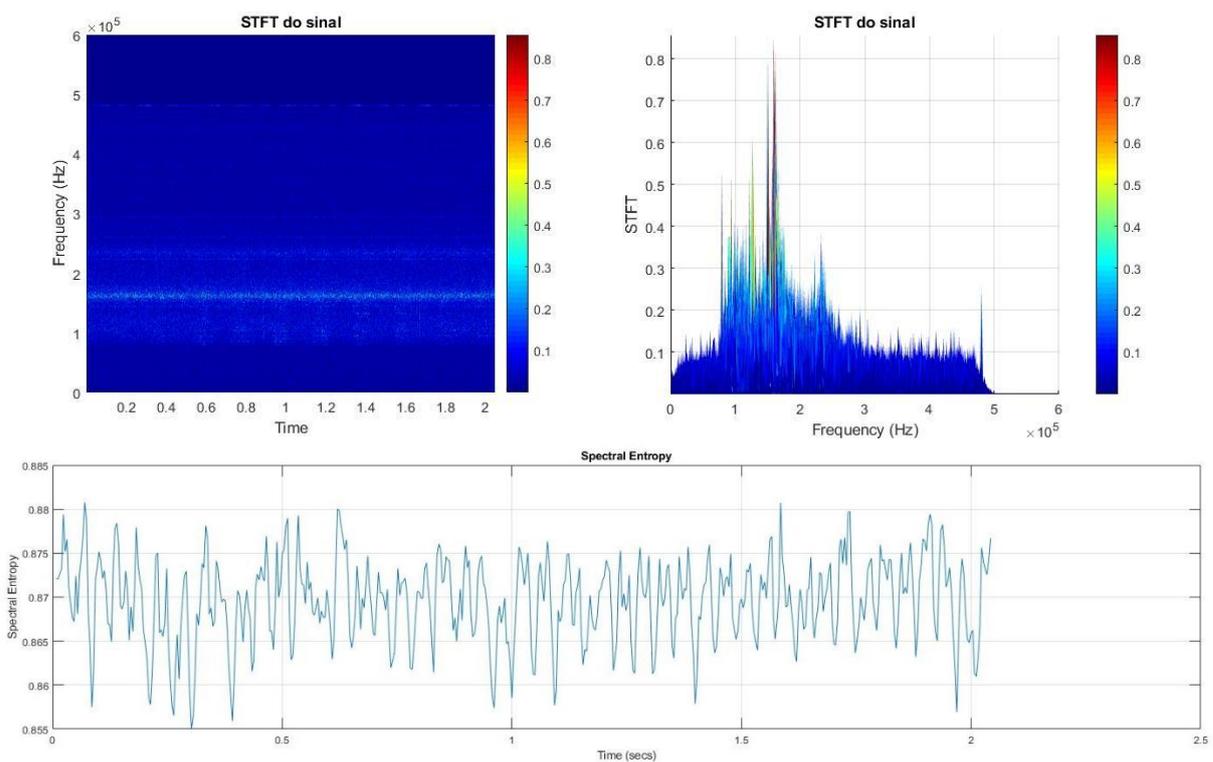
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 114 – Análise do sinal no ponto 391 – Defeito 01



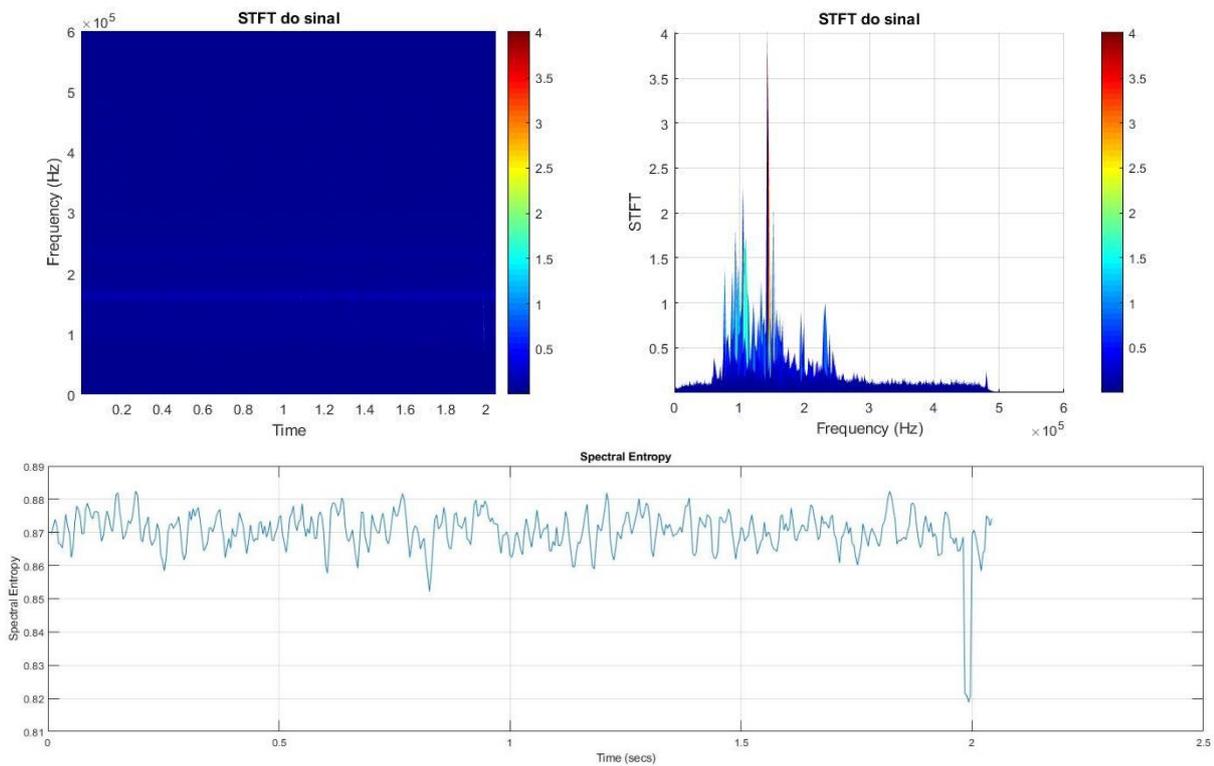
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 115 – Análise do sinal no ponto 400 – Defeito 01



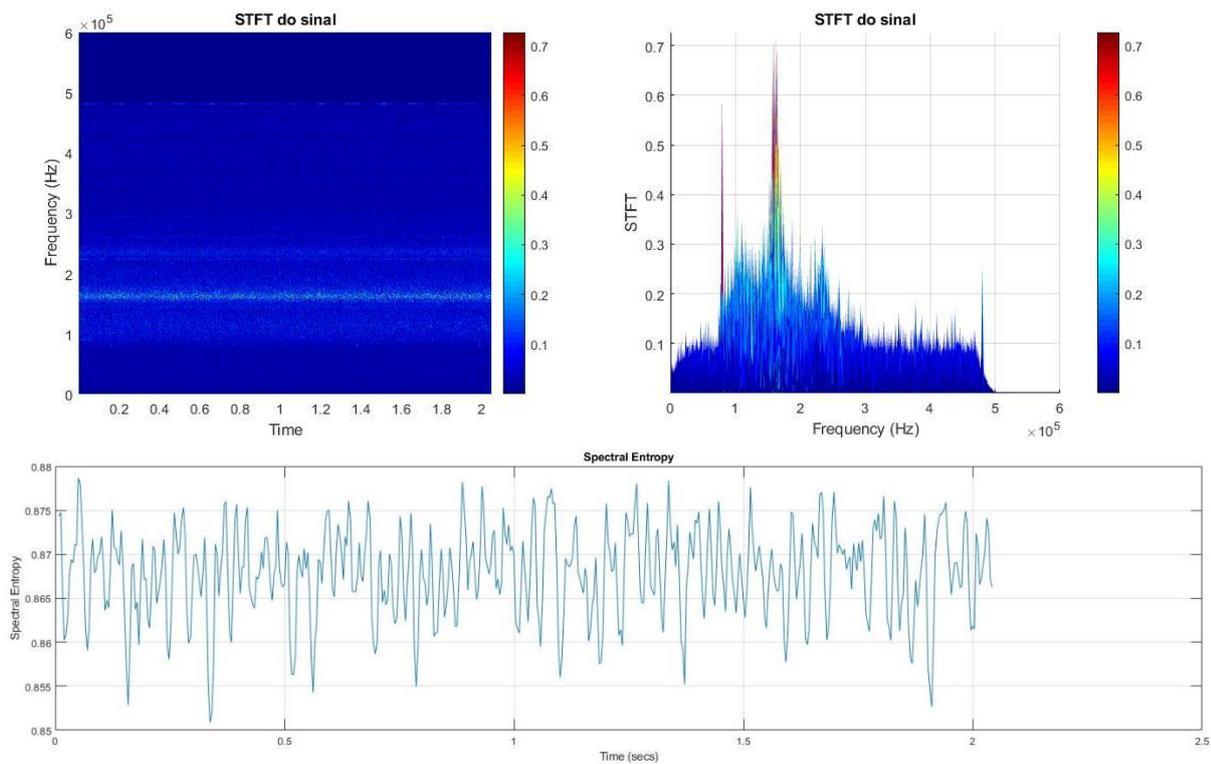
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 116 – Análise do sinal no ponto 453 – Defeito 01



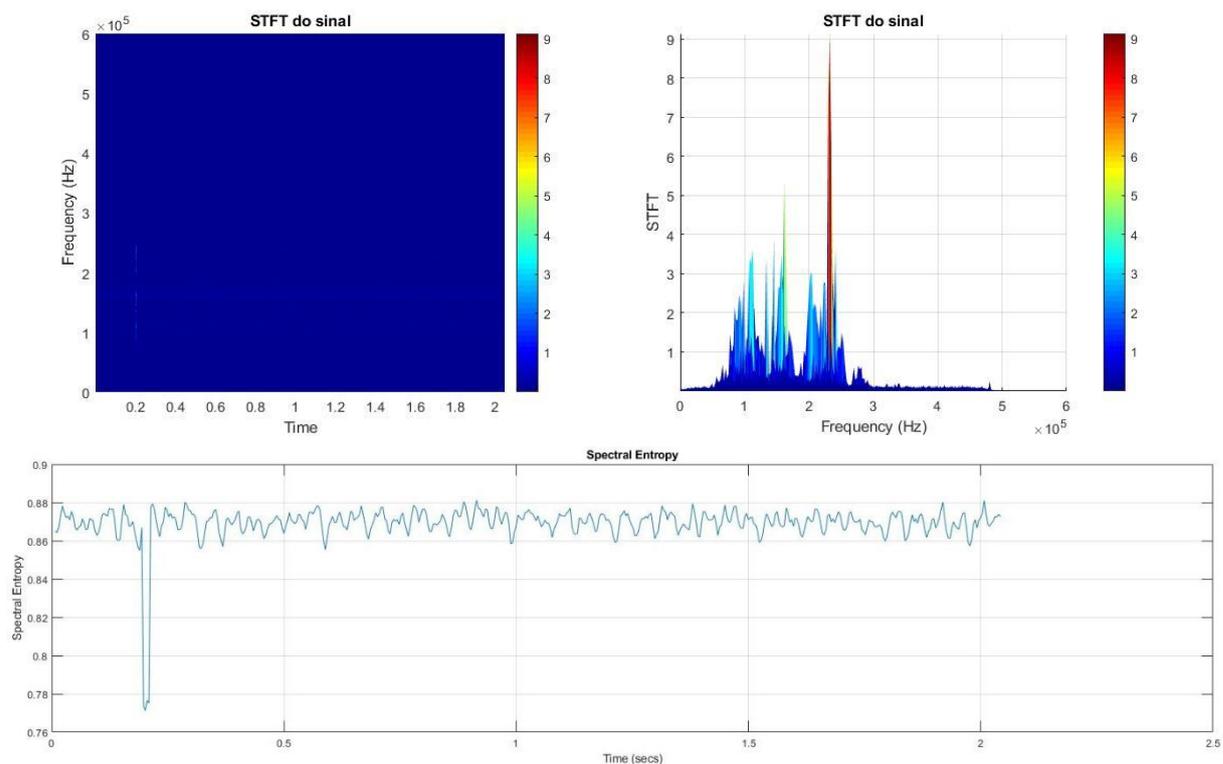
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 117 – Análise do sinal no ponto 514 – Defeito 01



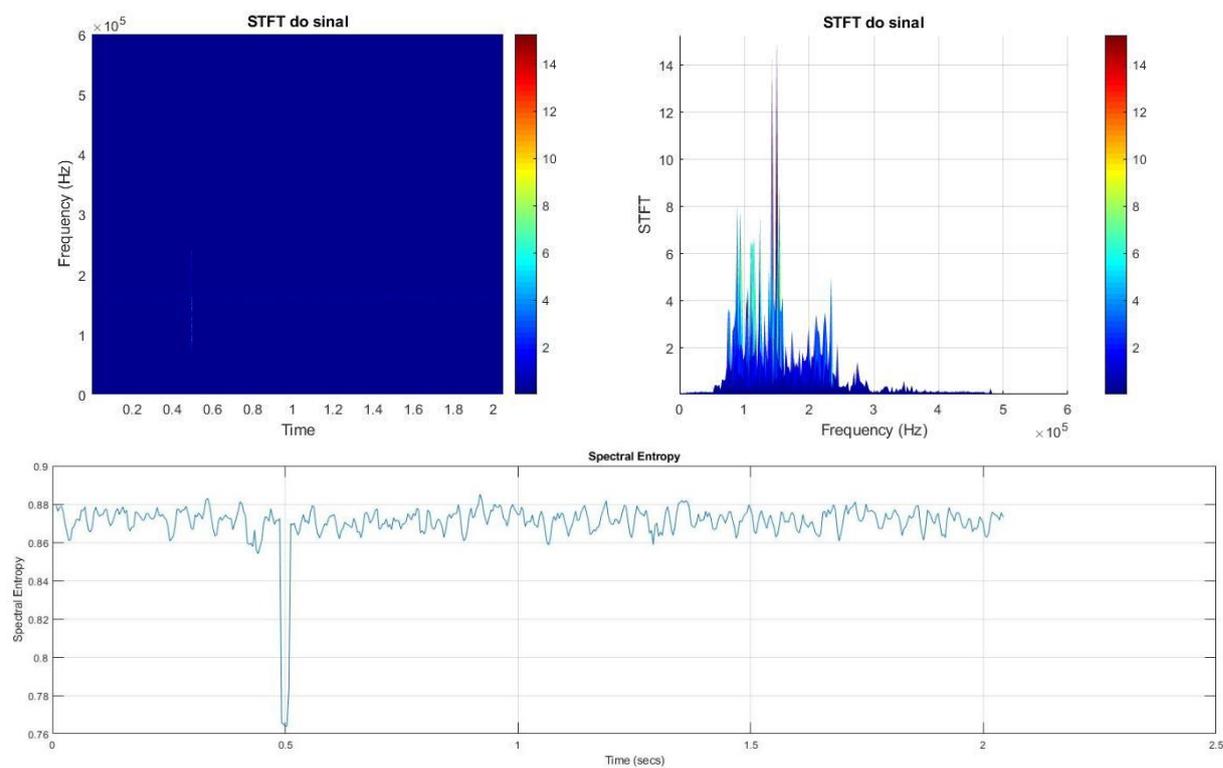
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 118 – Análise do sinal no ponto 542 – Defeito 01**



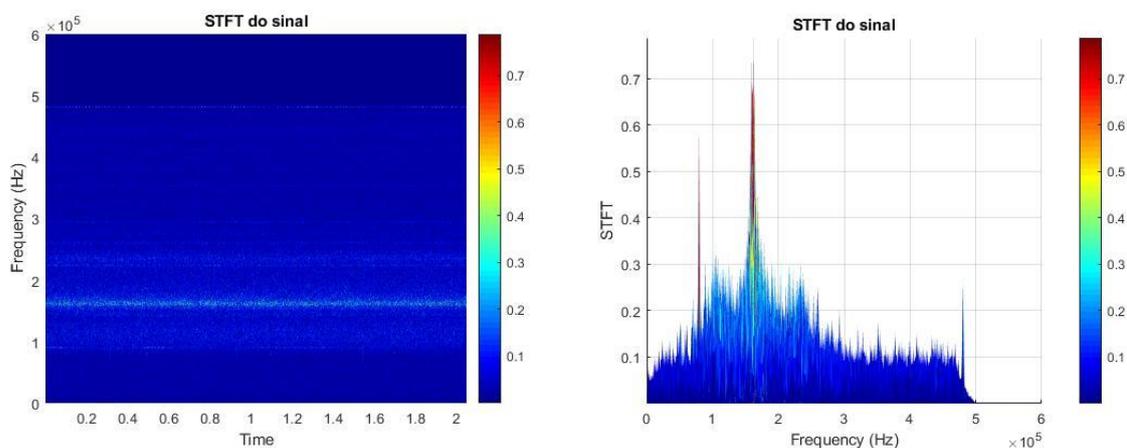
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 119 – Análise do sinal no ponto 644 – Defeito 01**

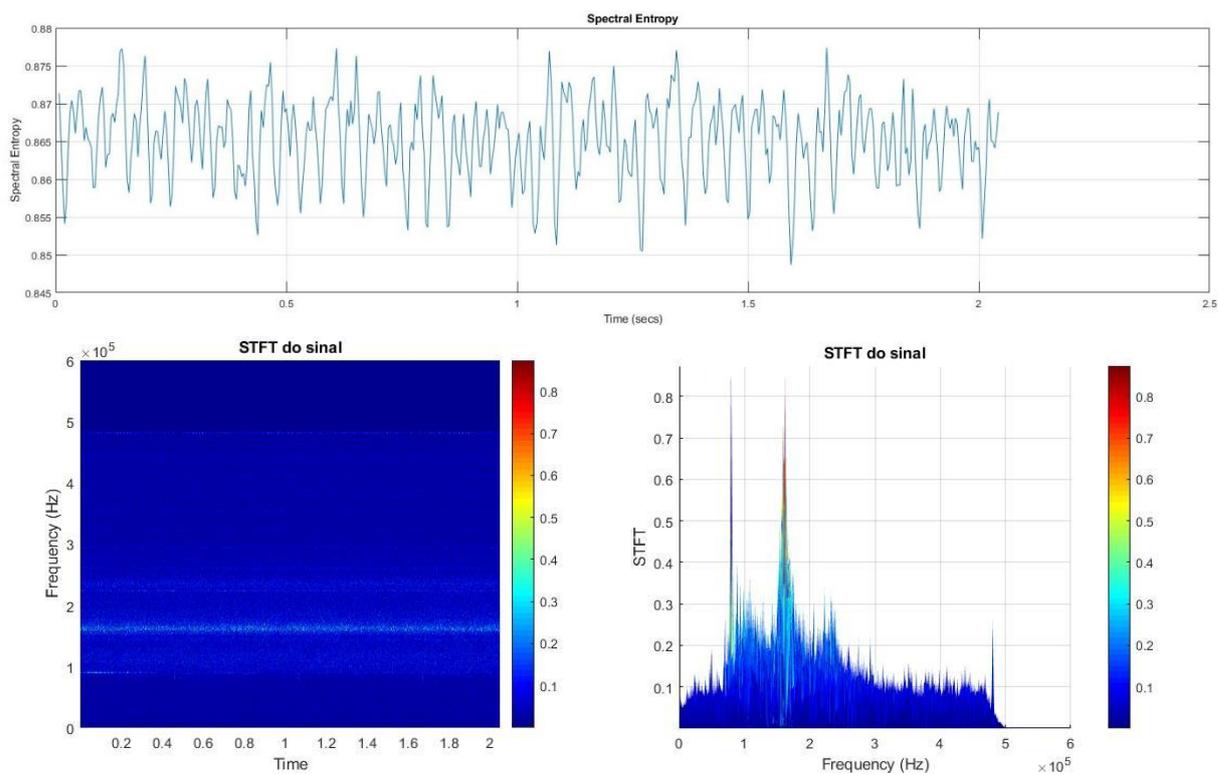


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)



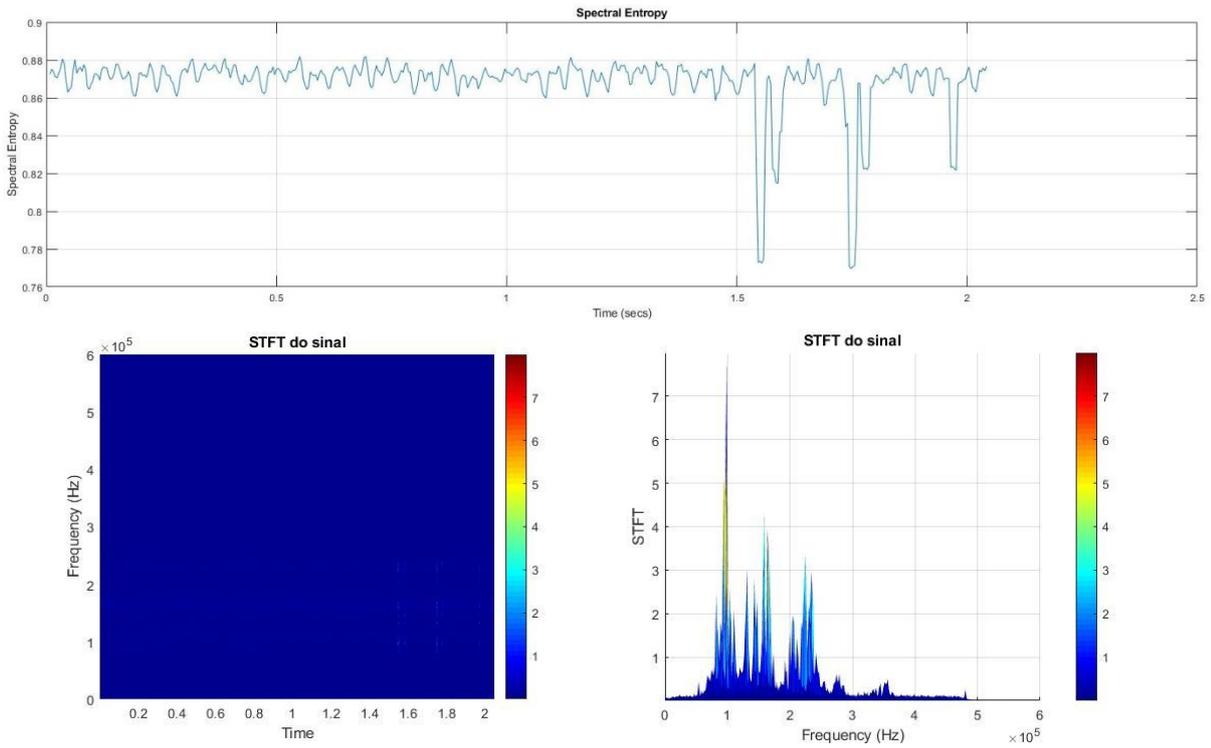
**APÊNDICE C – Complemento das análises da condição de Defeito 02****Figura 120 - Análise do sinal de EA no 2º ciclo – Defeito 02**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 121 - Análise do sinal de EA no 8º ciclo – Defeito 02**

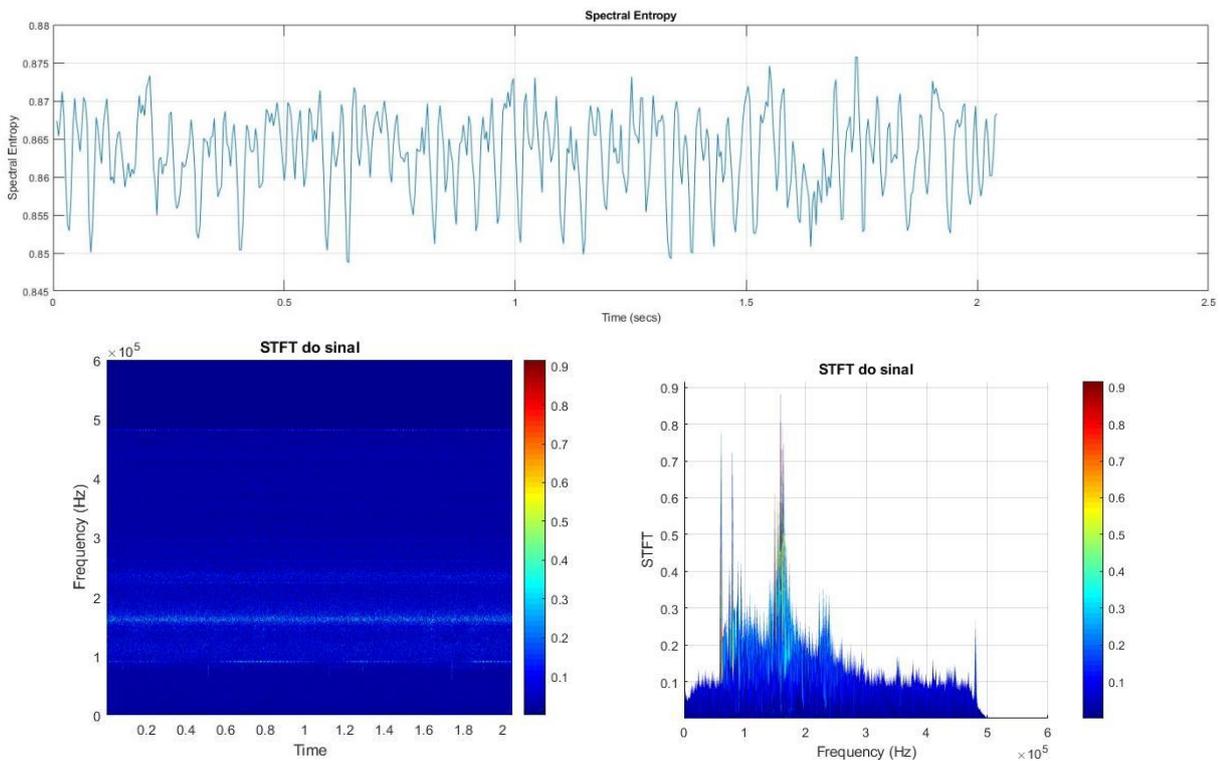
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 122 - Análise do sinal de EA no 19° ciclo – Defeito 02**



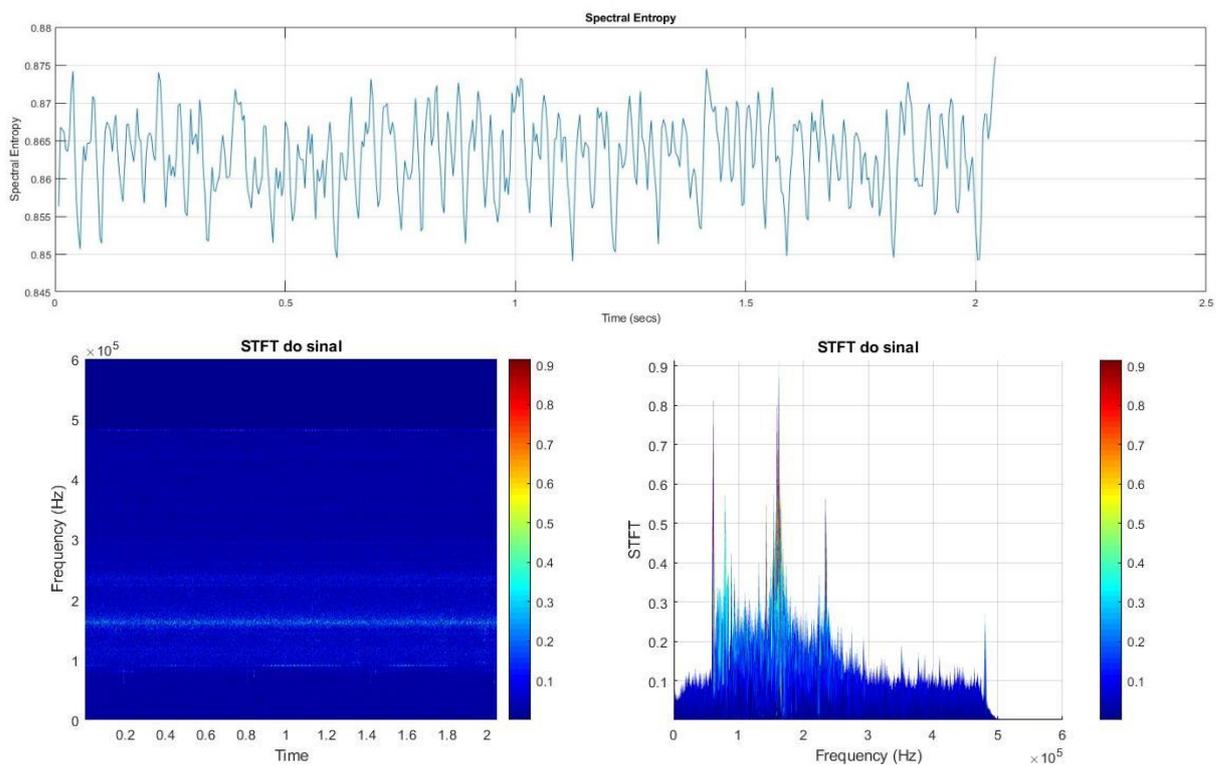
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 123 - Análise do sinal de EA no 76° ciclo – Defeito 02**



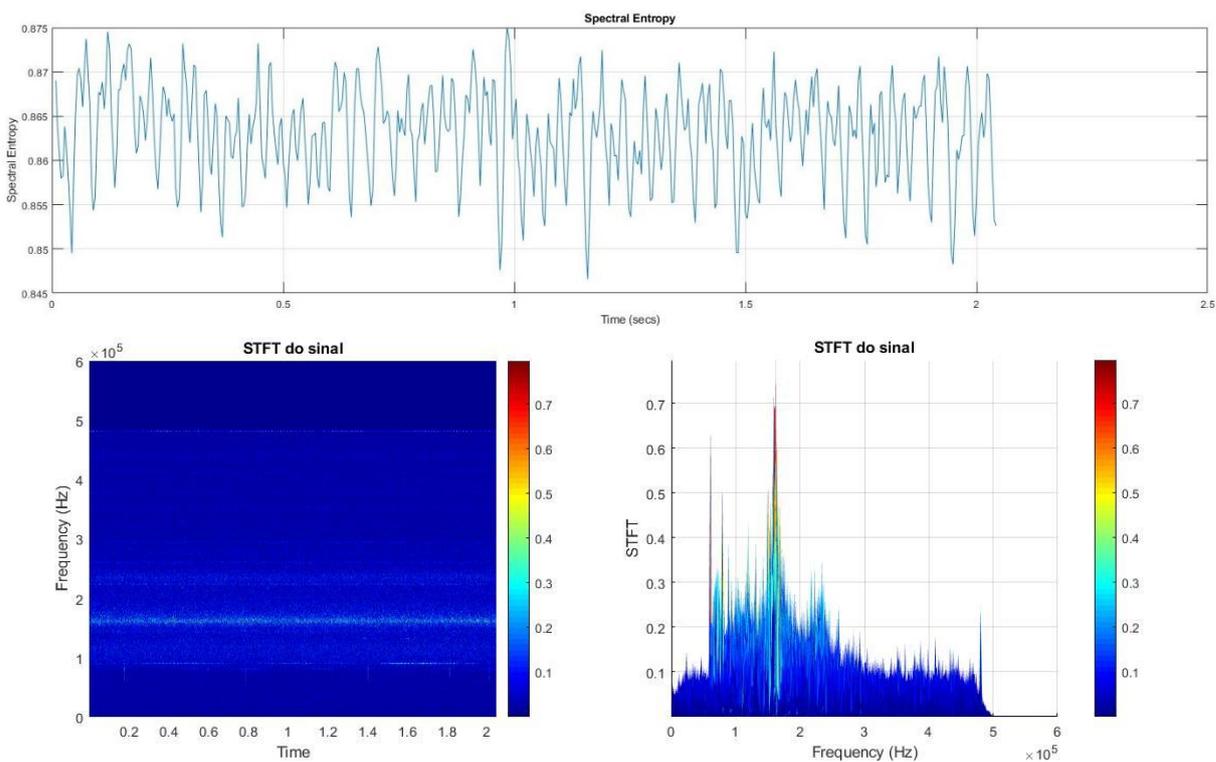
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 124 - Análise do sinal de EA no 80° ciclo – Defeito 02**



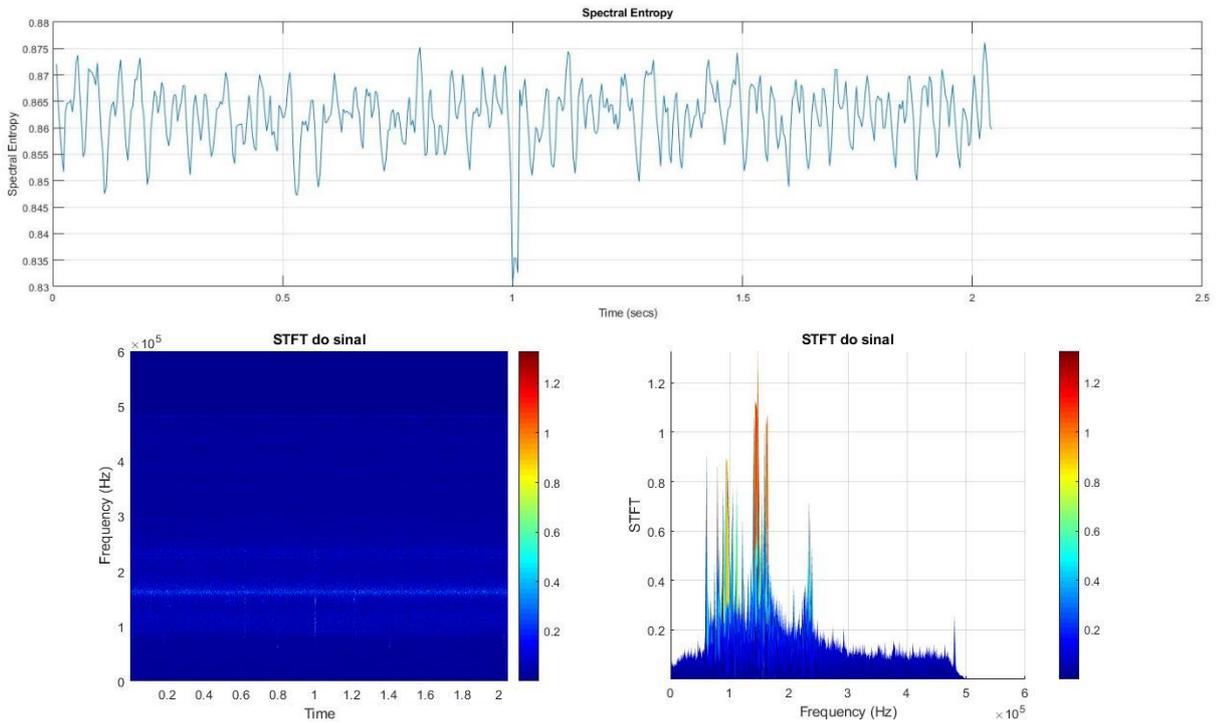
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 125 - Análise do sinal de EA no 91° ciclo – Defeito 02**



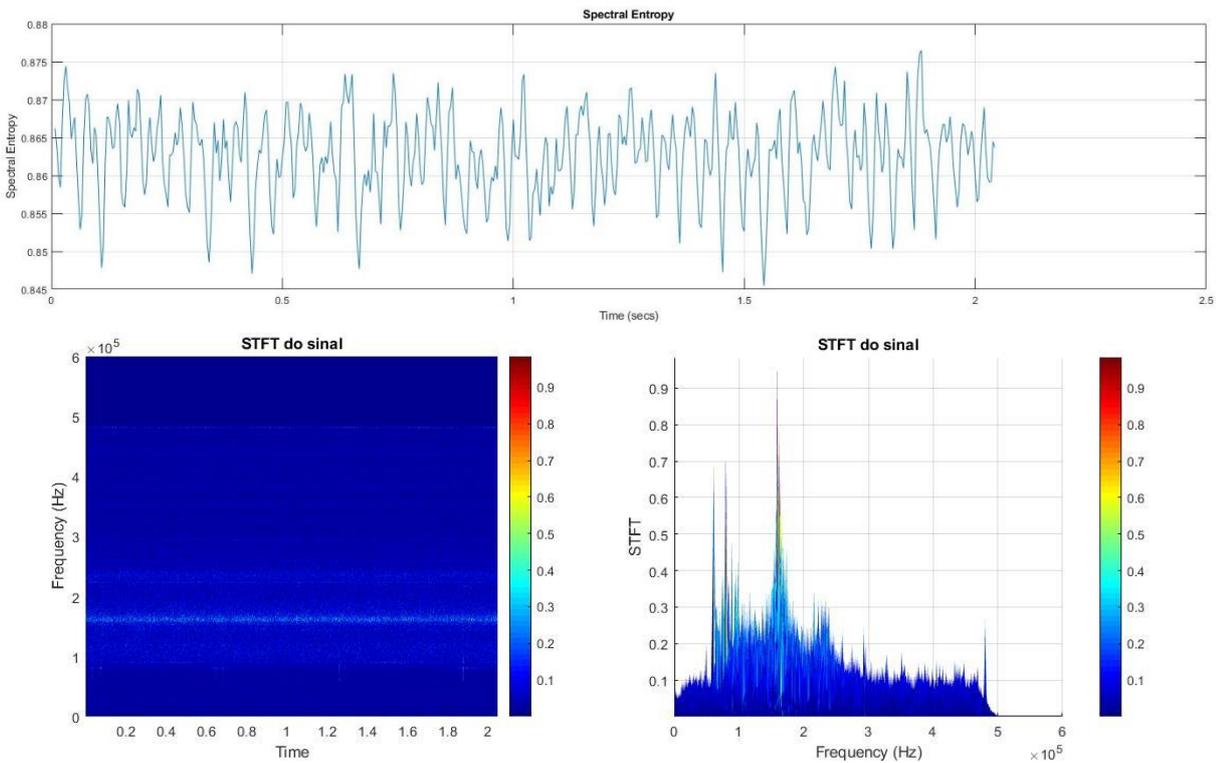
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 126 - Análise do sinal de EA no 101° ciclo – Defeito 02**



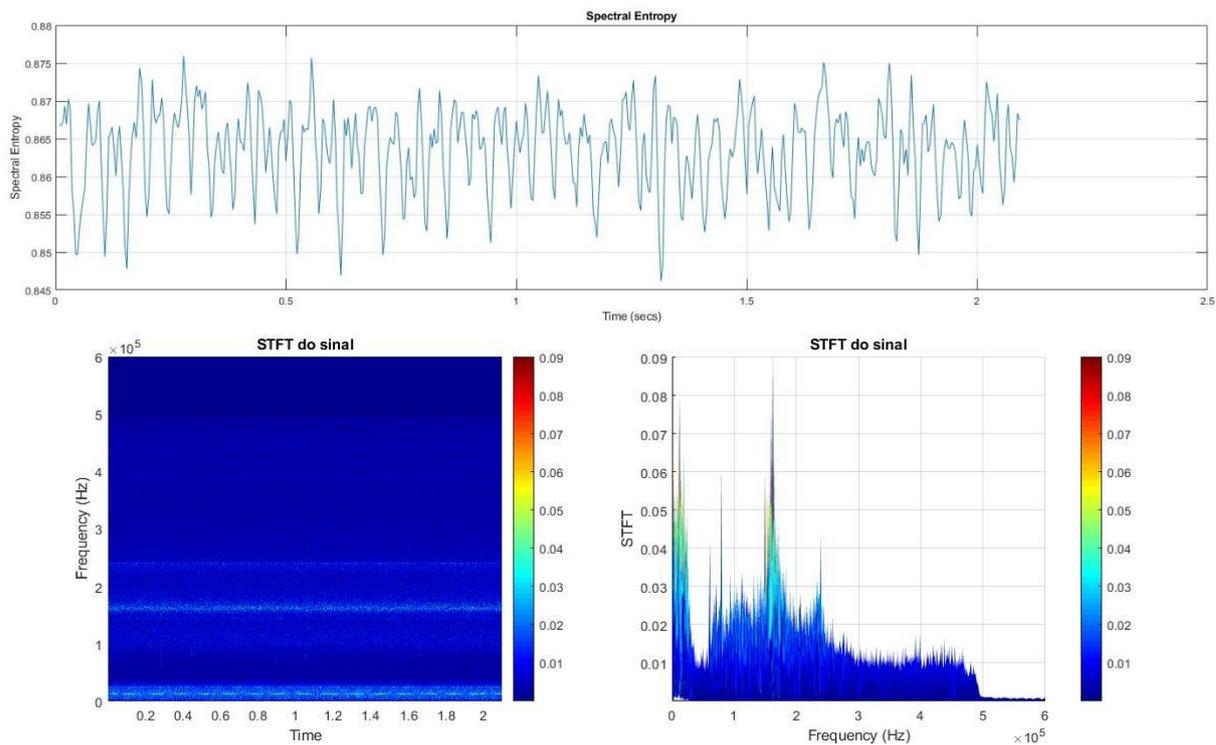
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 127 - Análise do sinal de EA no 107° ciclo – Defeito 02**



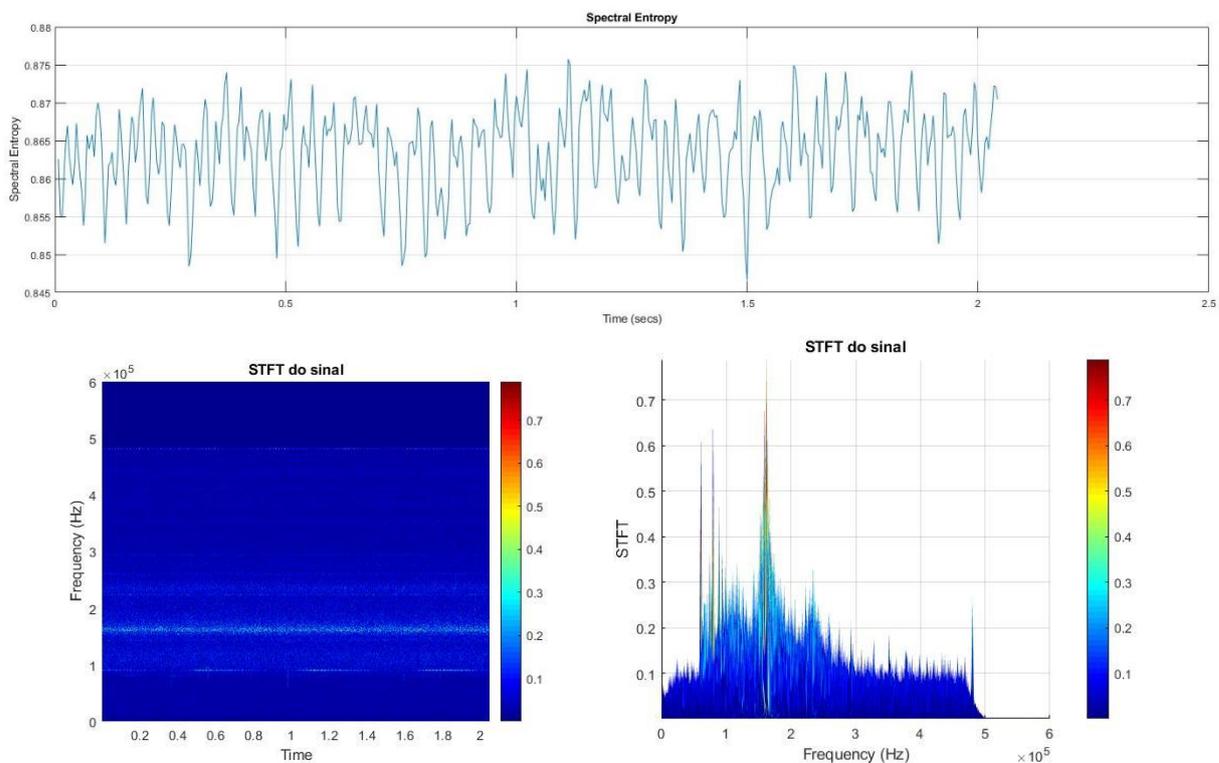
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 128 - Análise do sinal de EA no 124° ciclo – Defeito 02**



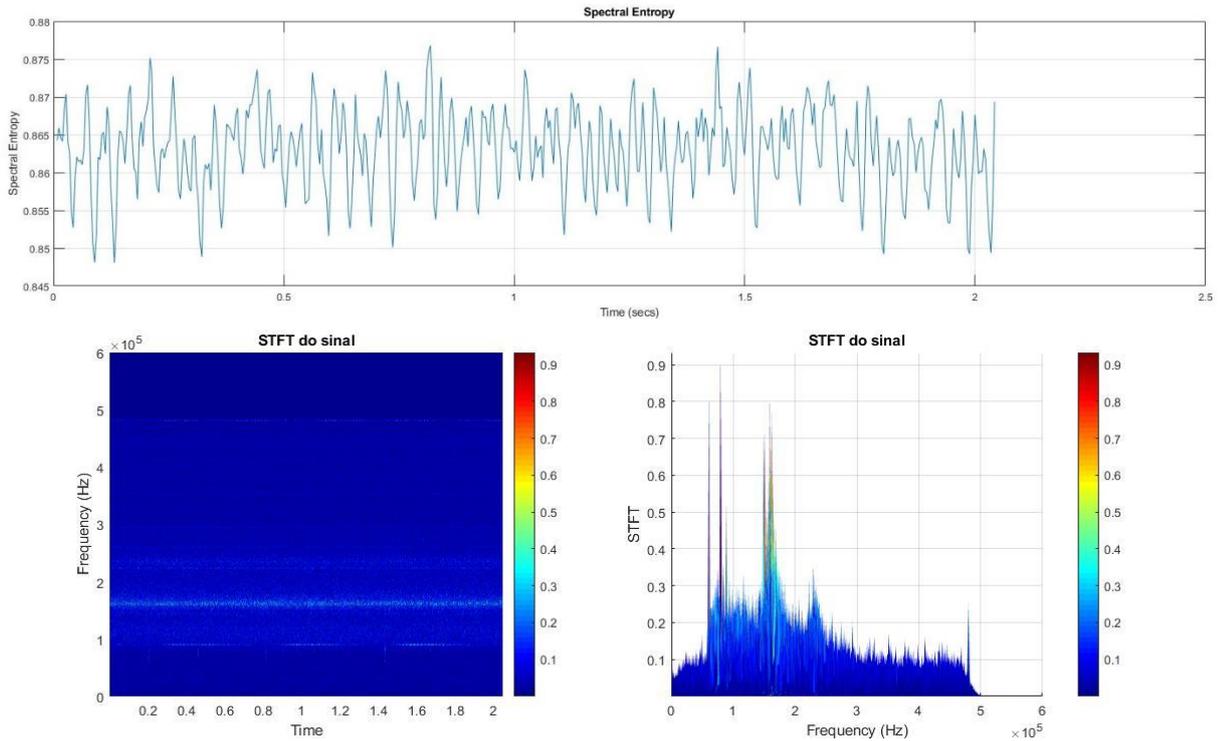
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 129 - Análise do sinal de EA no 135° ciclo – Defeito 02



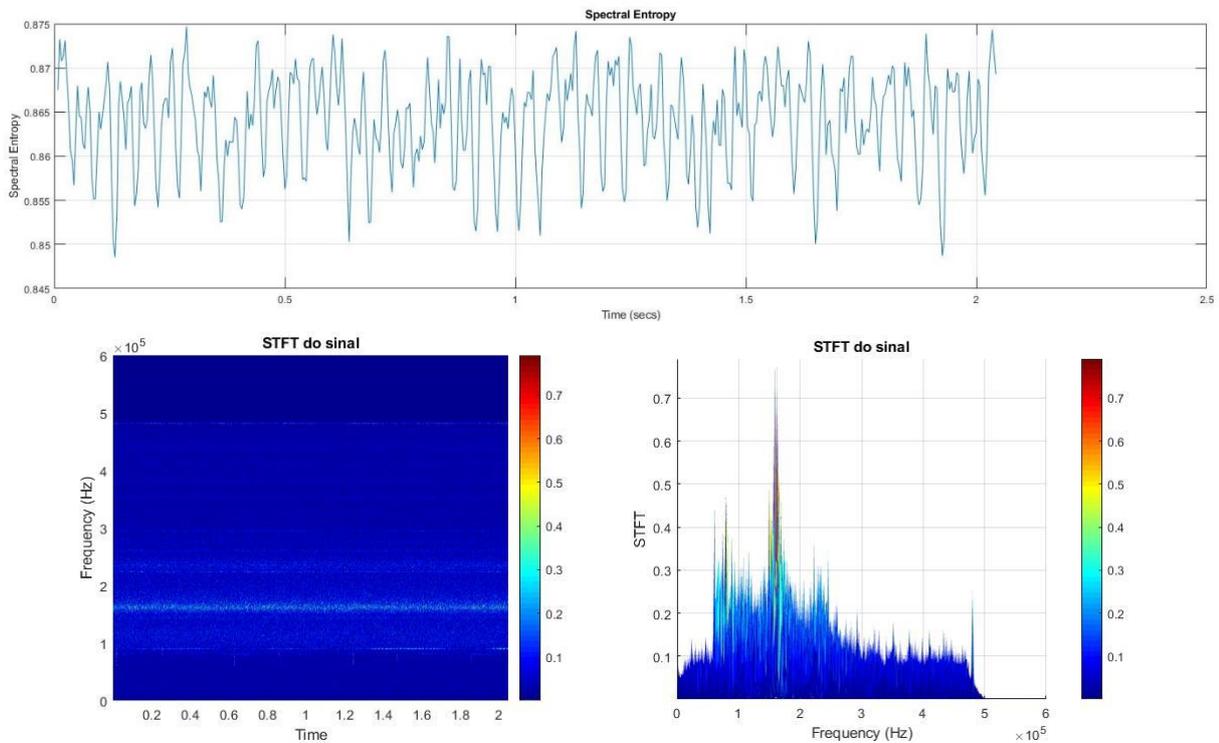
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 130 - Análise do sinal de EA no 142° ciclo – Defeito 02



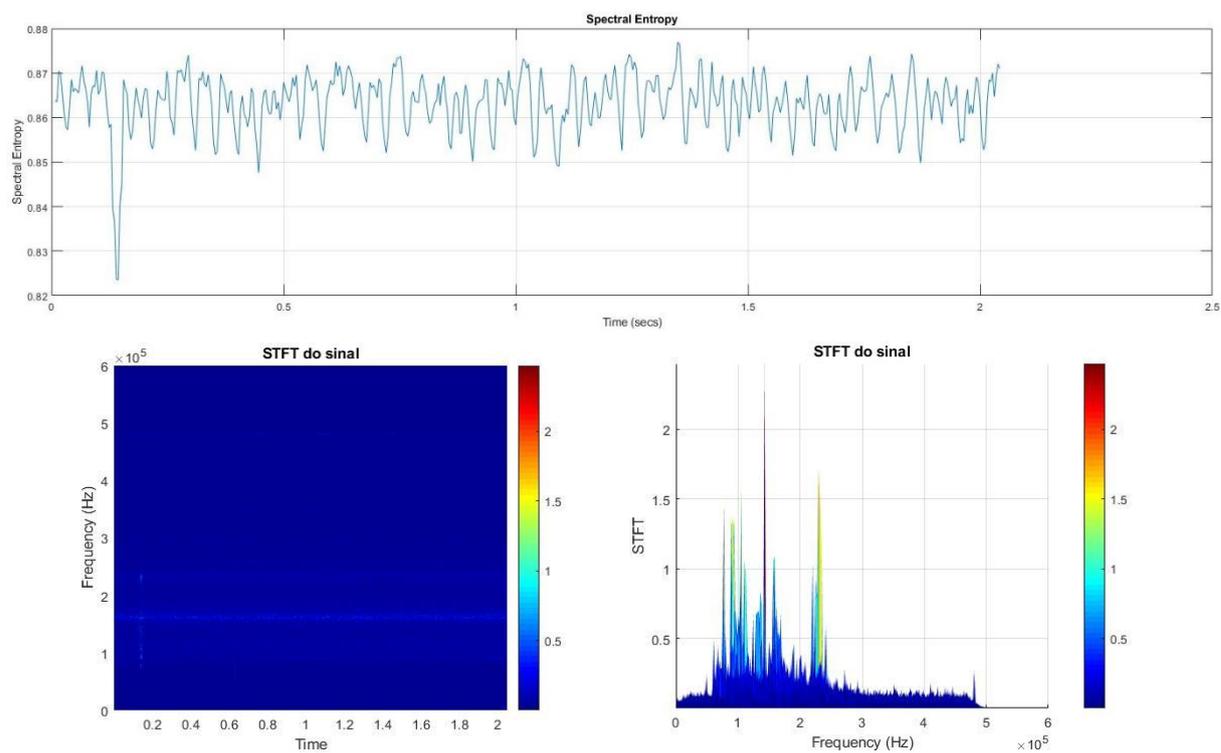
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 131 - Análise do sinal de EA no 157° ciclo – Defeito 02



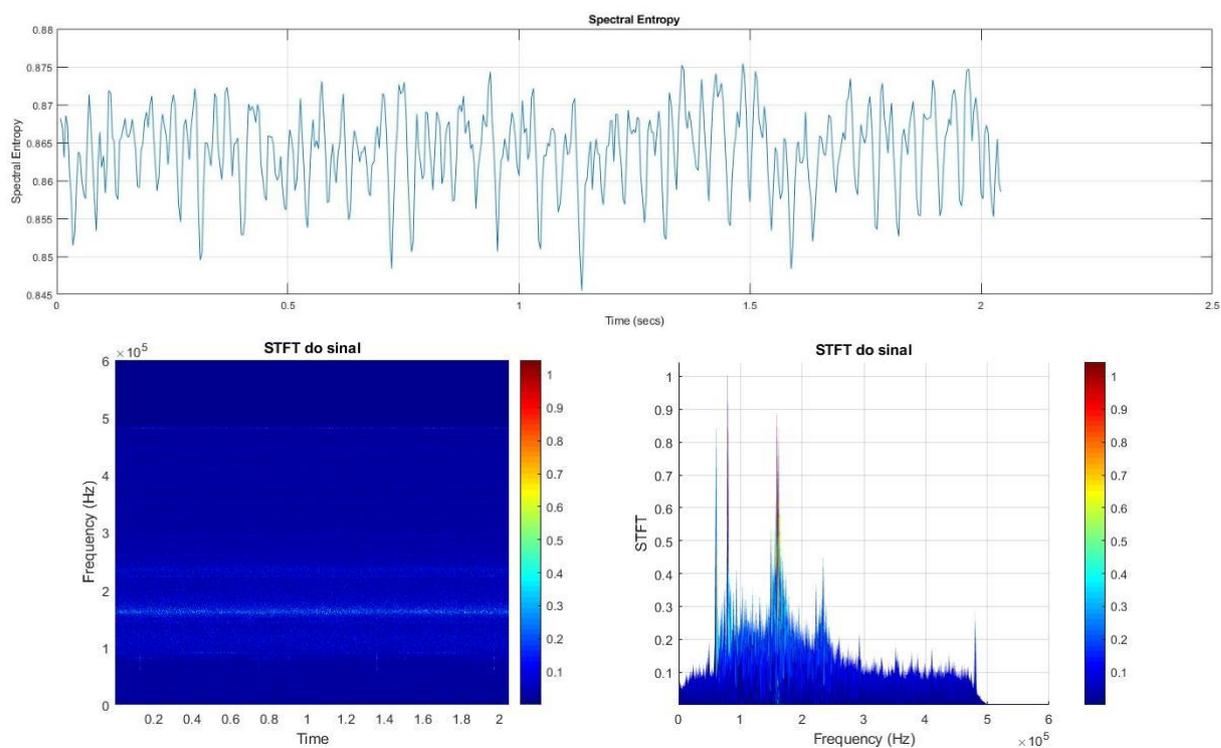
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 132 - Análise do sinal de EA no 165° ciclo – Defeito 02



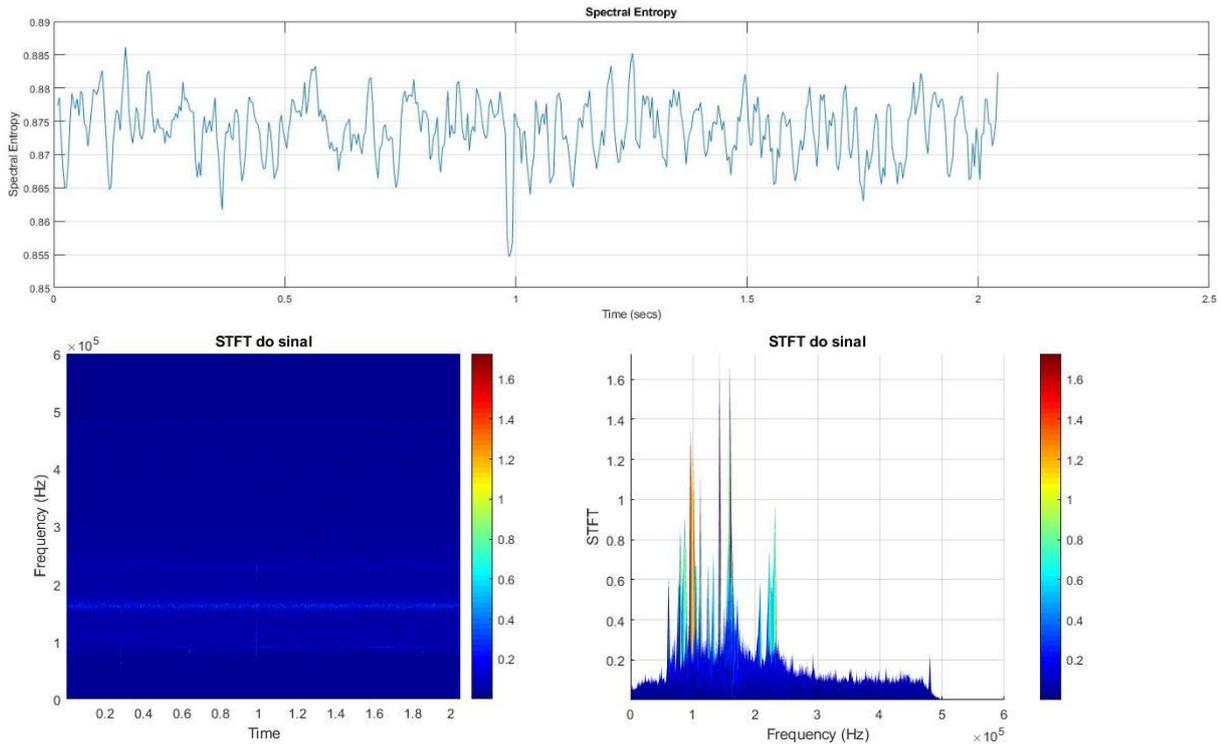
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 133 - Análise do sinal de EA no 177° ciclo – Defeito 02**



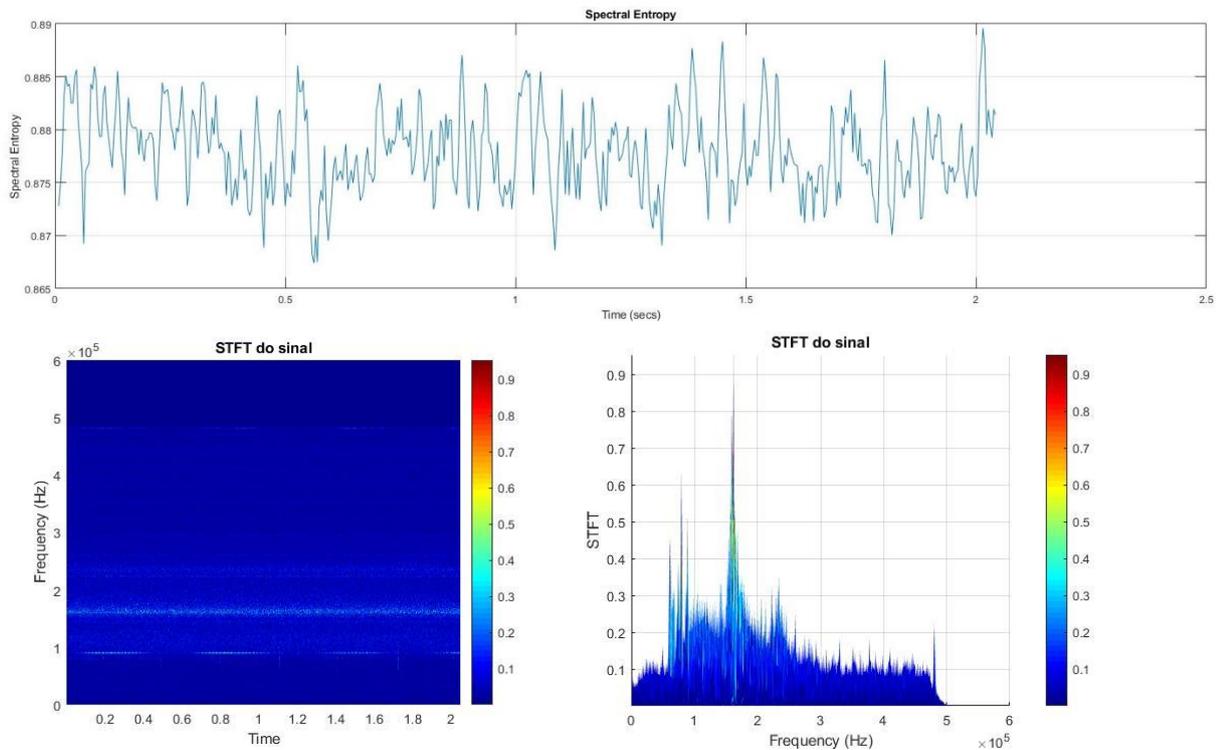
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 134 -Análise do sinal de EA no 341° ciclo – Defeito 02**



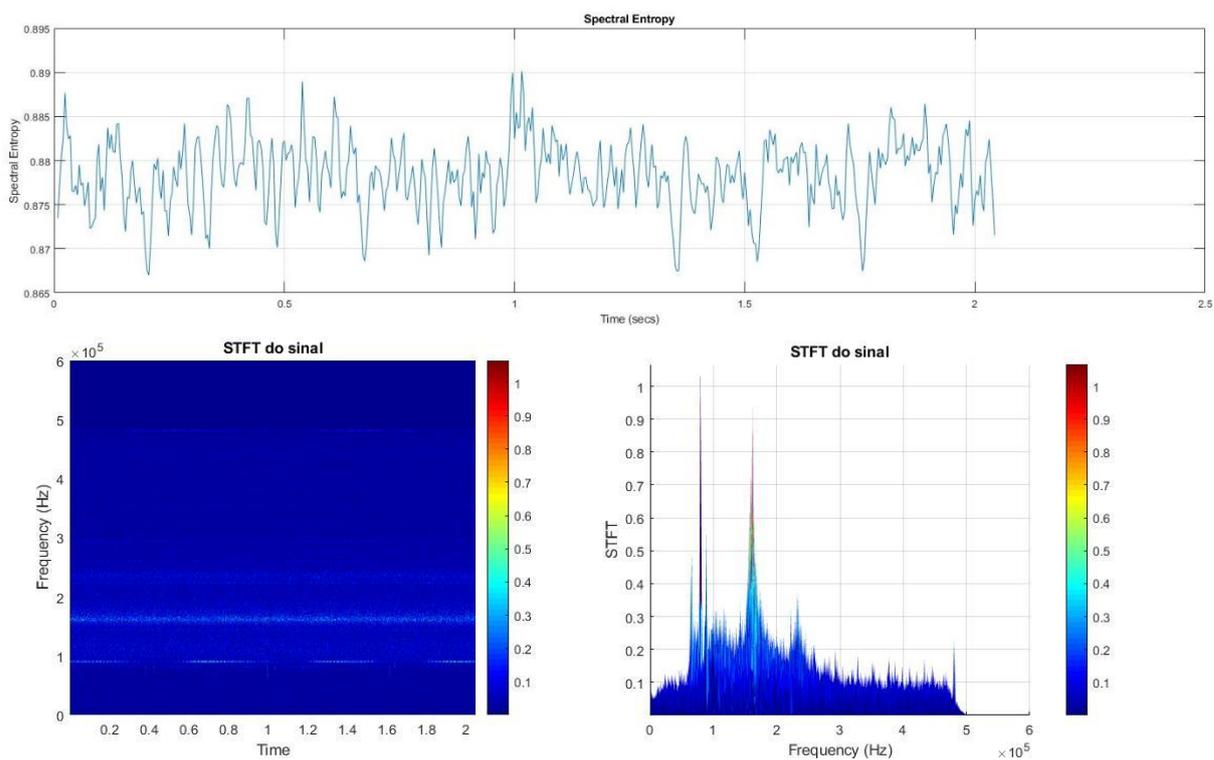
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 135 -Análise do sinal de EA no 497° ciclo – Defeito 02



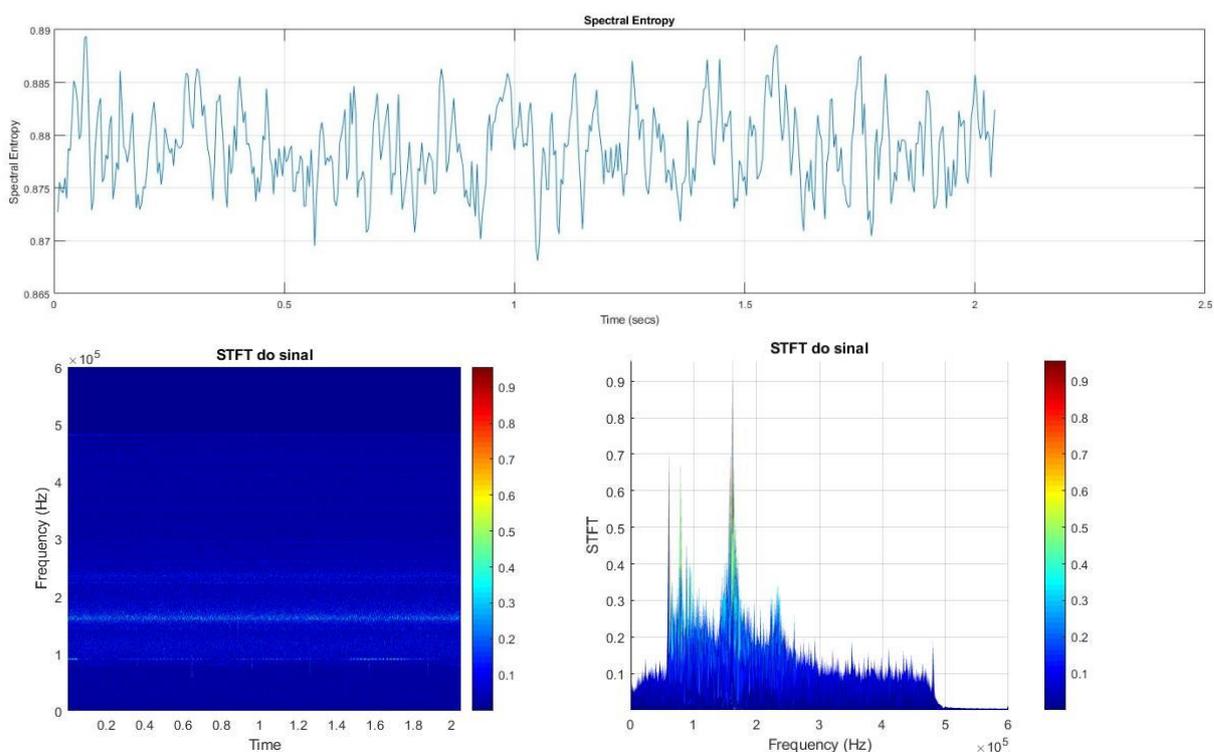
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 136 -Análise do sinal de EA no 514° ciclo – Defeito 02



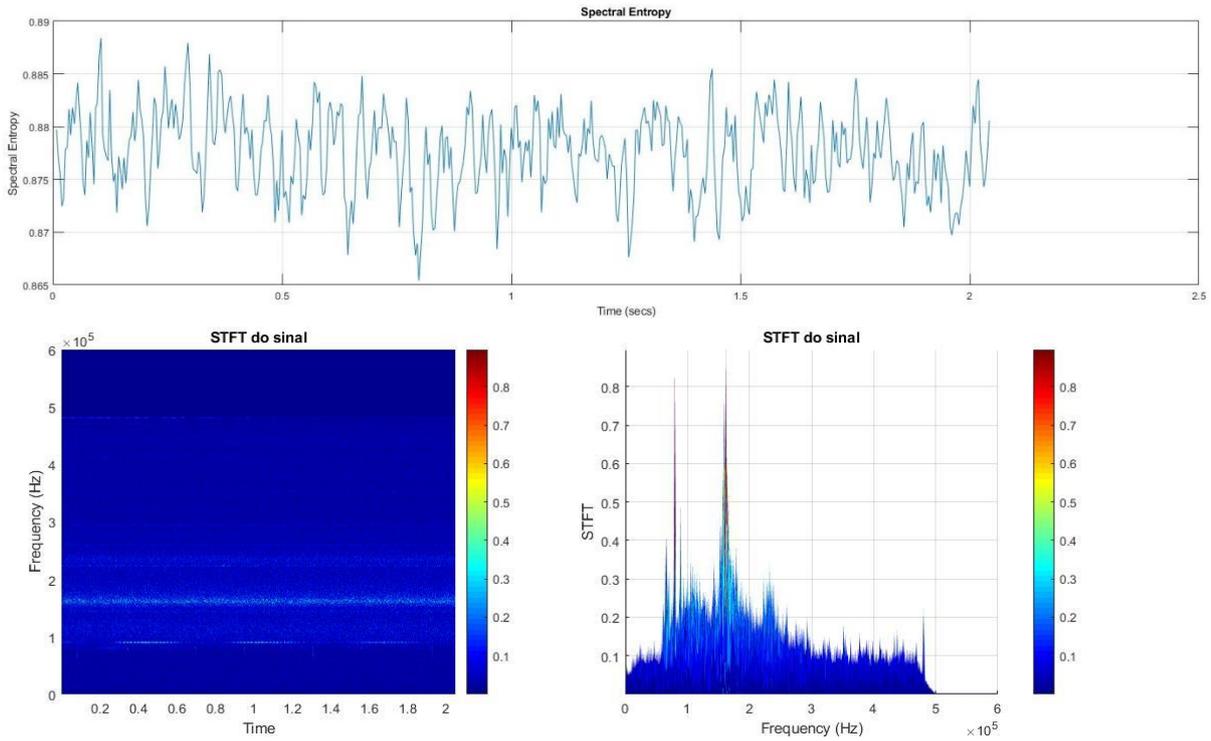
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 137 -Análise do sinal de EA no 542° ciclo – Defeito 02**



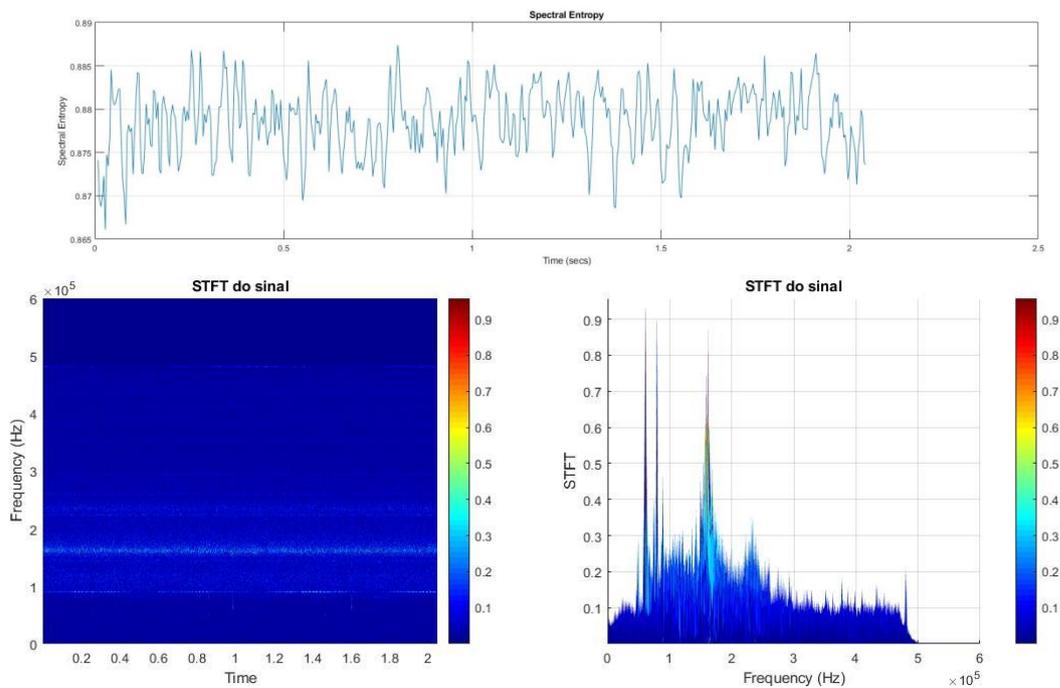
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 138 -Análise do sinal de EA no 586° ciclo – Defeito 02**



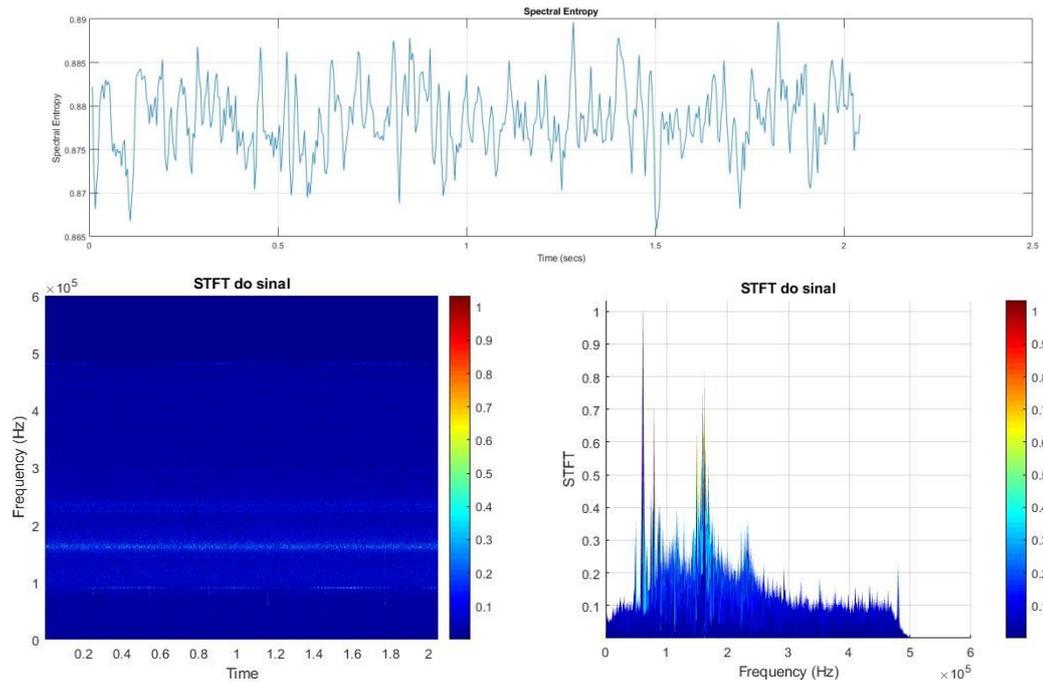
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 139 -Análise do sinal de EA no 644° ciclo – Defeito 02**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

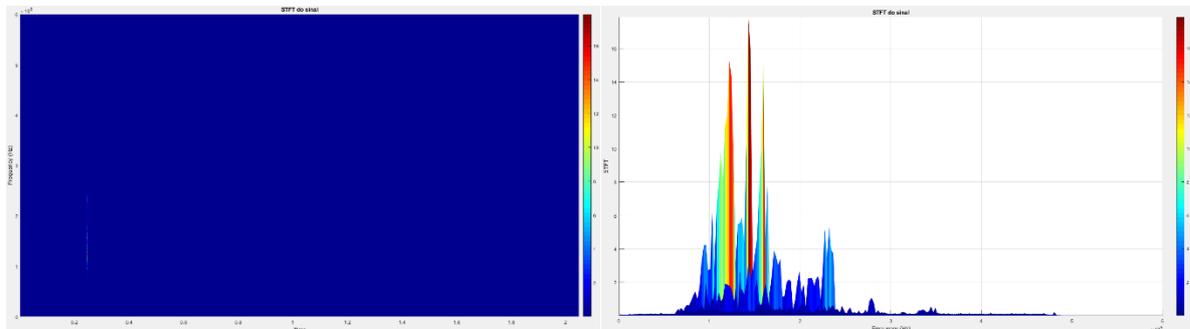
**Figura 140 -Análise do sinal de EA no 646° ciclo – Defeito 02**



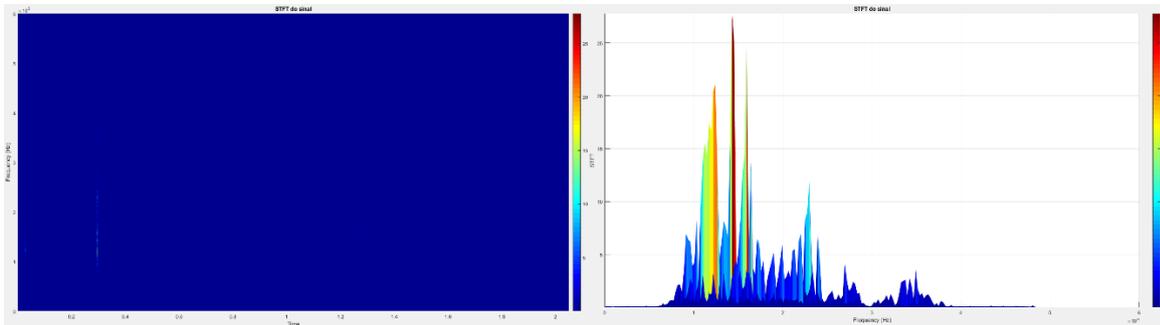
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

## APÊNDICE D – Complemento das análises da condição de Defeito 03

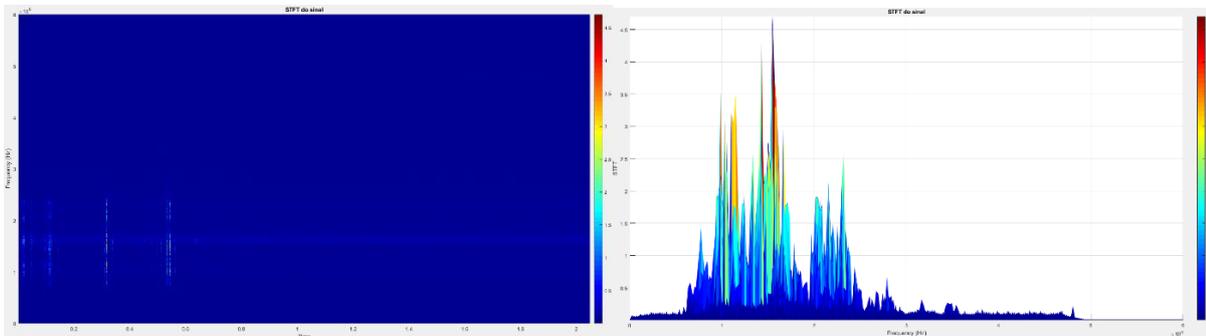
Figura 141 - Análise do sinal de EA no 492° ciclo – Defeito 03



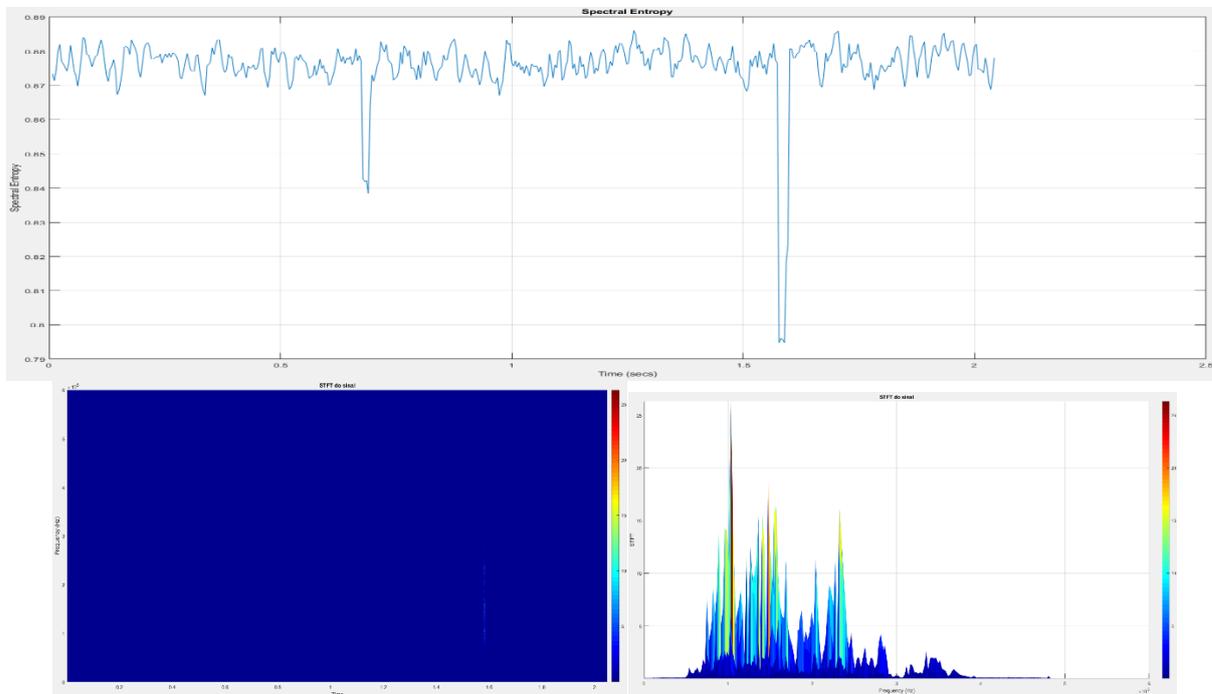
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 142 - Análise do sinal de EA no 493° ciclo – Defeito 03**

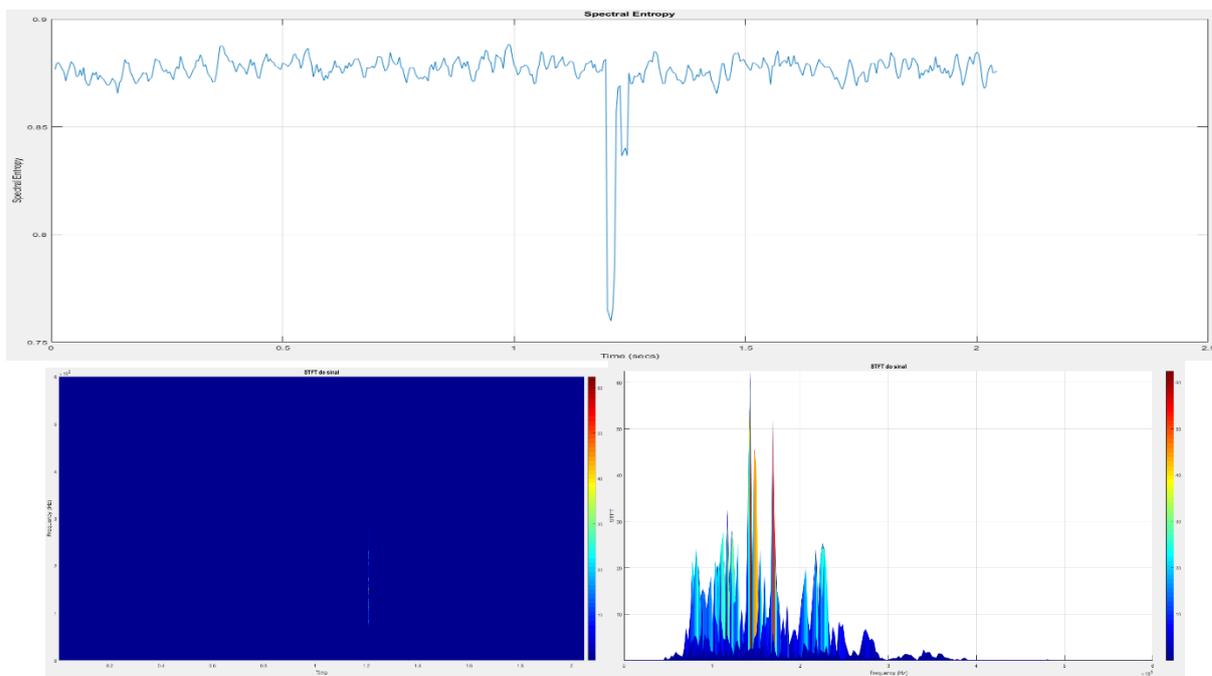
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 143 - Análise do sinal de EA no 647° ciclo – Defeito 03**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

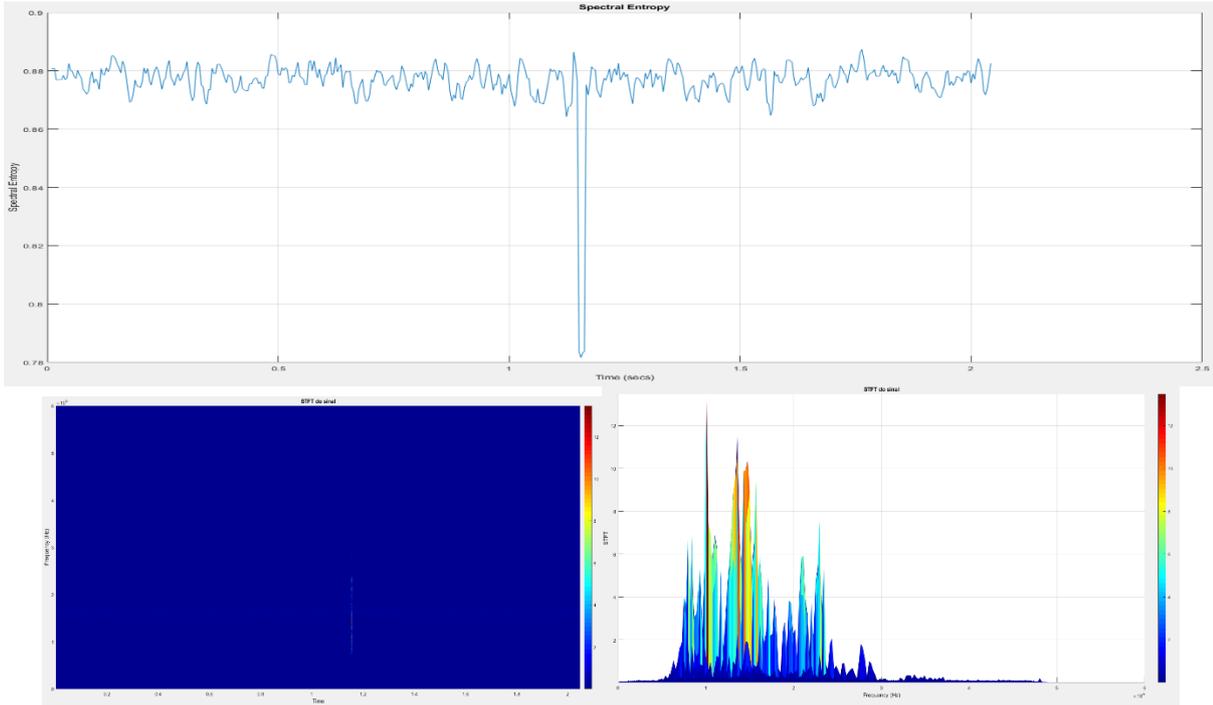
**APÊNDICE E – Complemento das análises da condição de Defeito 04****Figura 144 - Análise do sinal de EA no 208° ciclo – Defeito 04**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 145 - Análise do sinal de EA no 361° ciclo – Defeito 04**

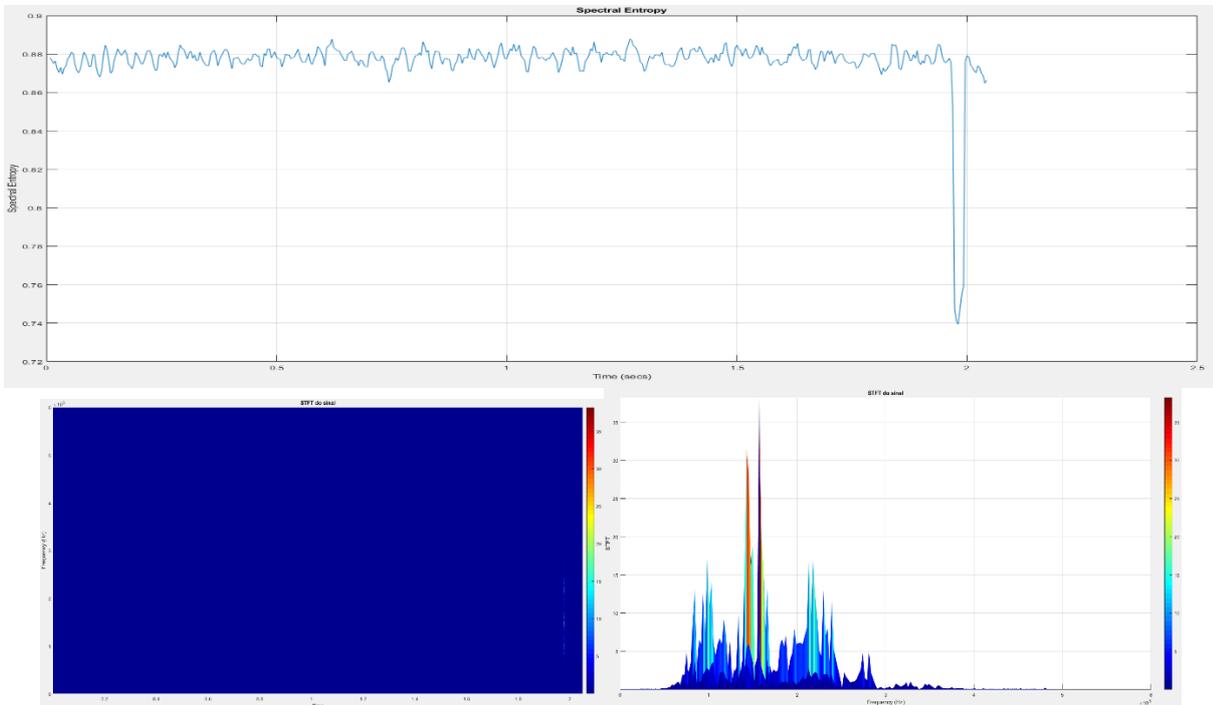
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 146 - Análise do sinal de EA no 471° ciclo – Defeito 04**

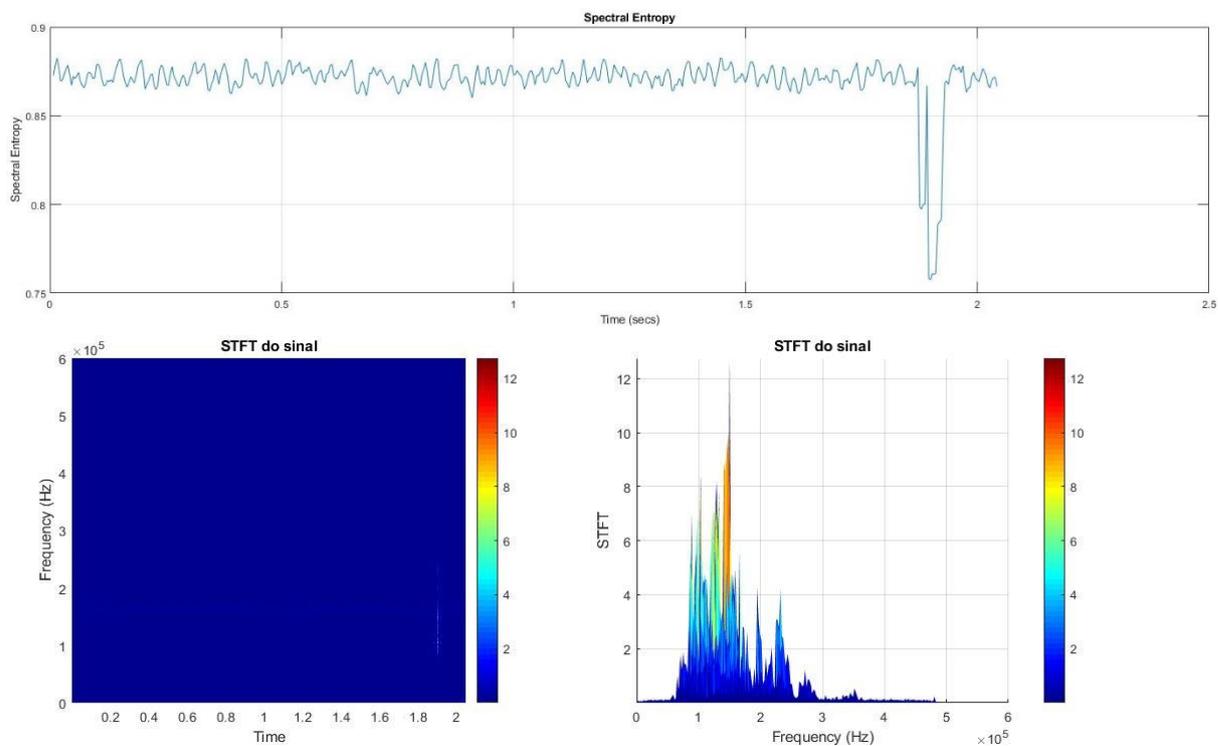


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

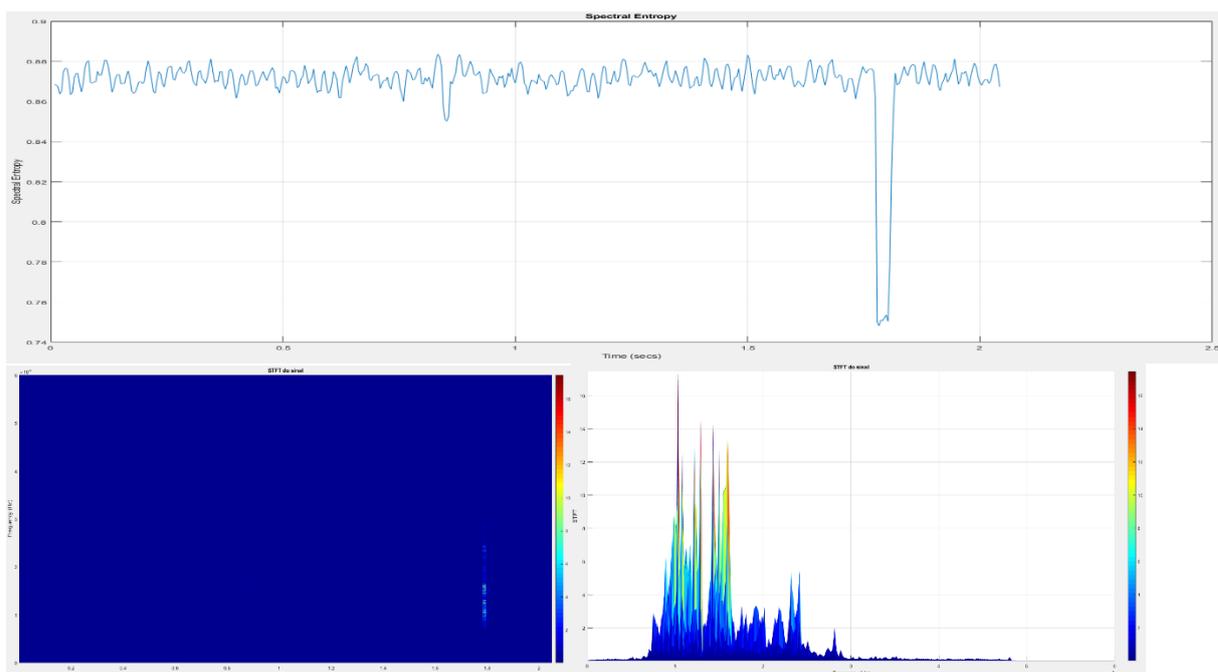
Figura 147 - Análise do sinal de EA no 484° ciclo – Defeito 04



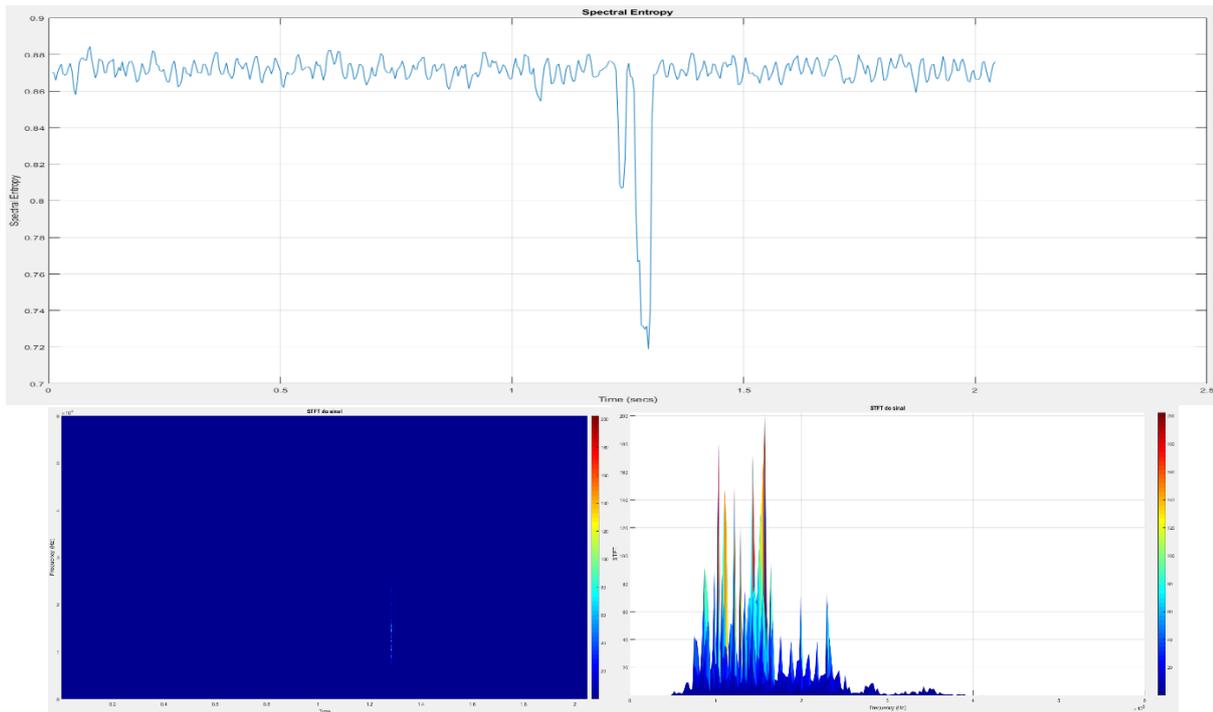
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**APÊNDICE F – Complemento das análises da condição de Falha 01****Figura 148 - Análise do sinal de EA no 27° ciclo – Falha 01**

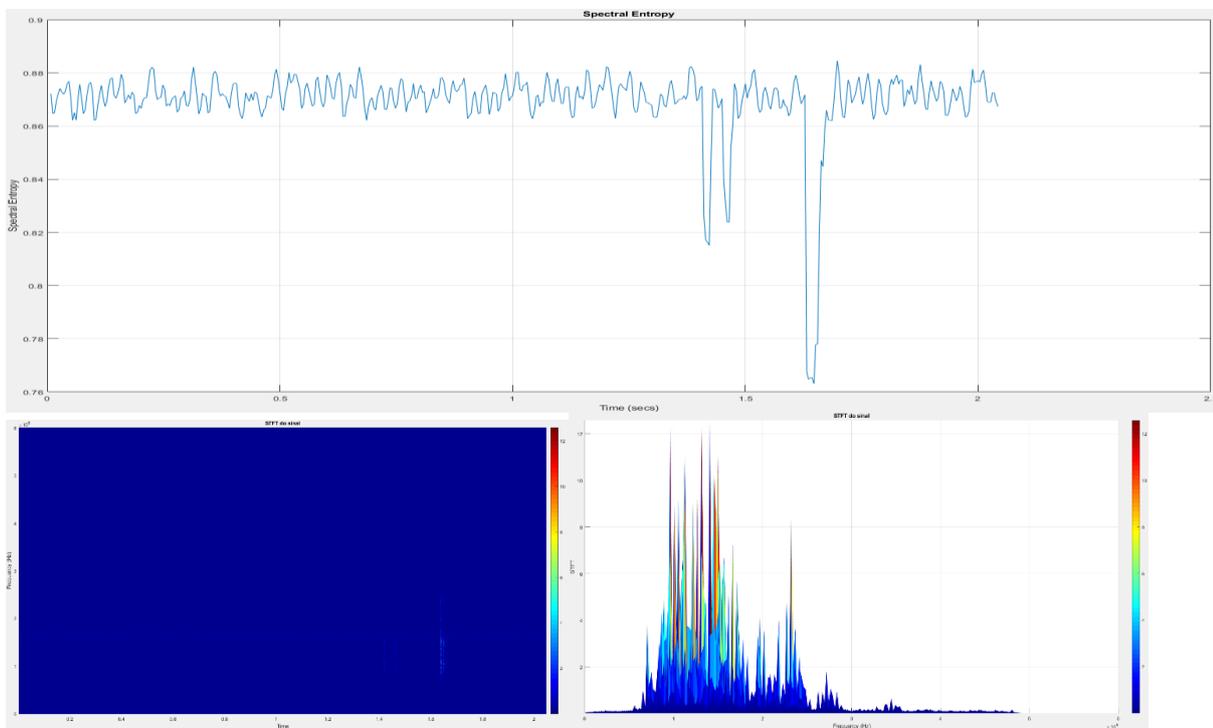
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 149 - Análise do sinal de EA no 56° ciclo – Falha 01**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

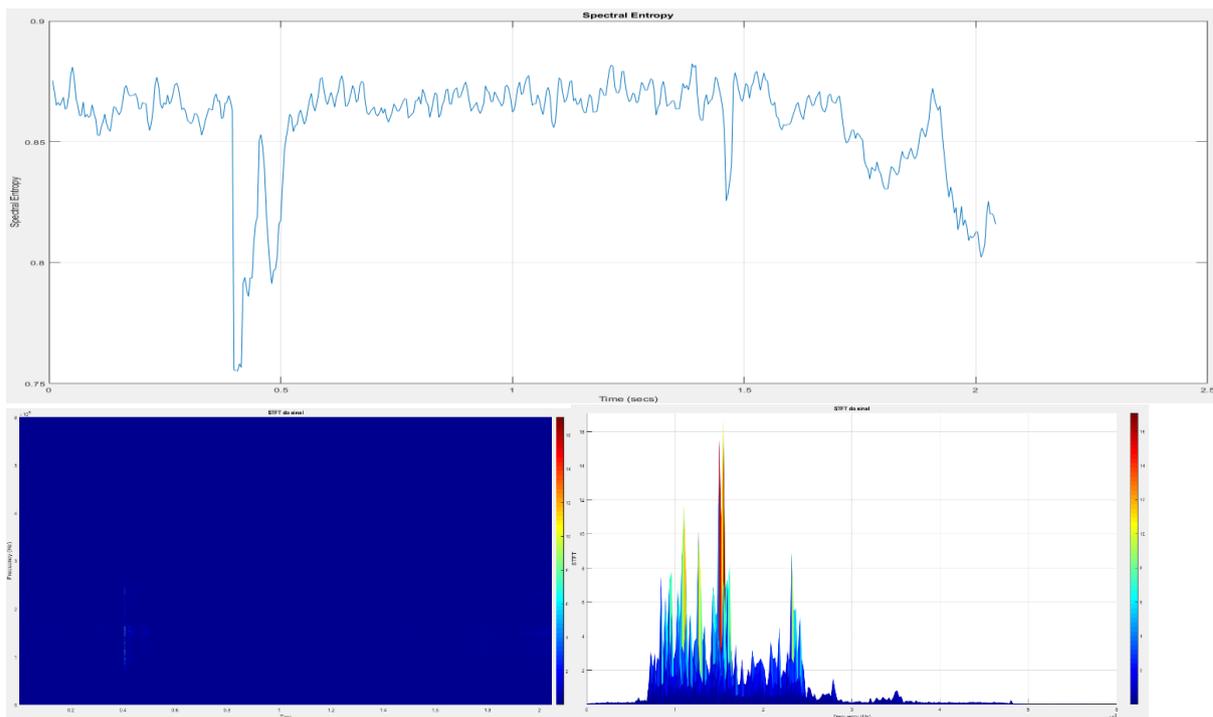
**Figura 150 - Análise do sinal de EA no 79° ciclo – Falha 01**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 151 - Análise do sinal de EA no 87° ciclo – Falha 01**

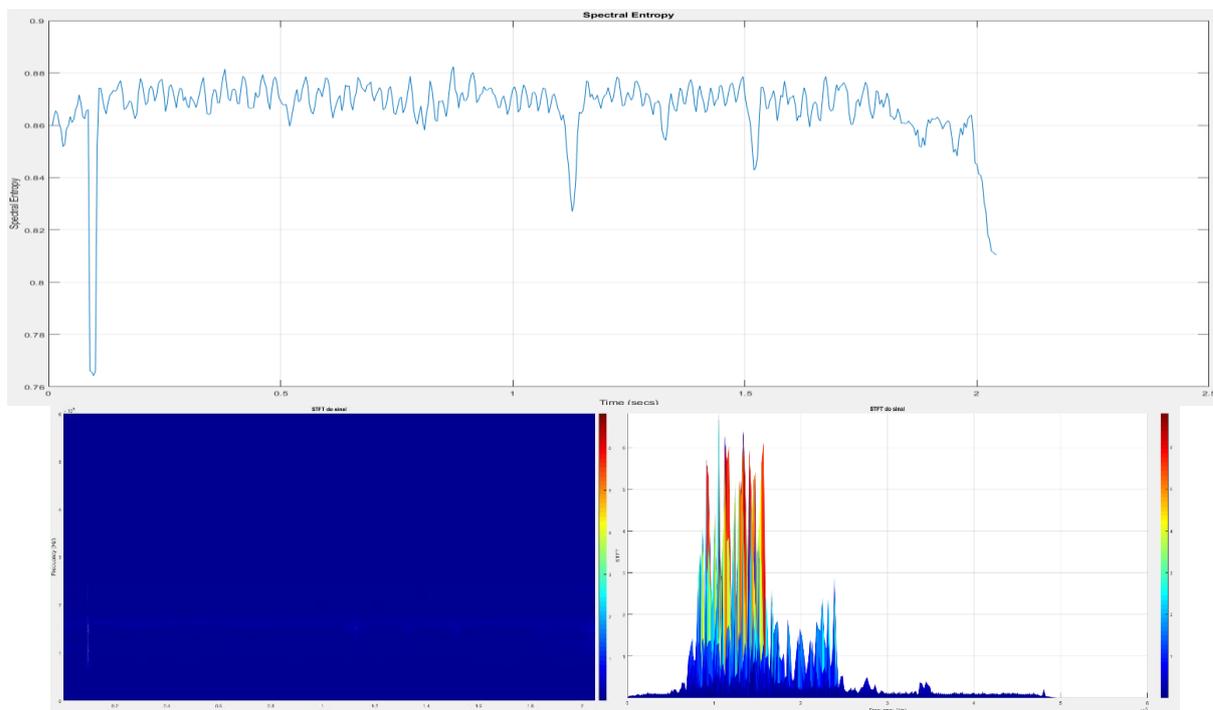
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 152 - Análise do sinal de EA no 154° ciclo – Falha 01**



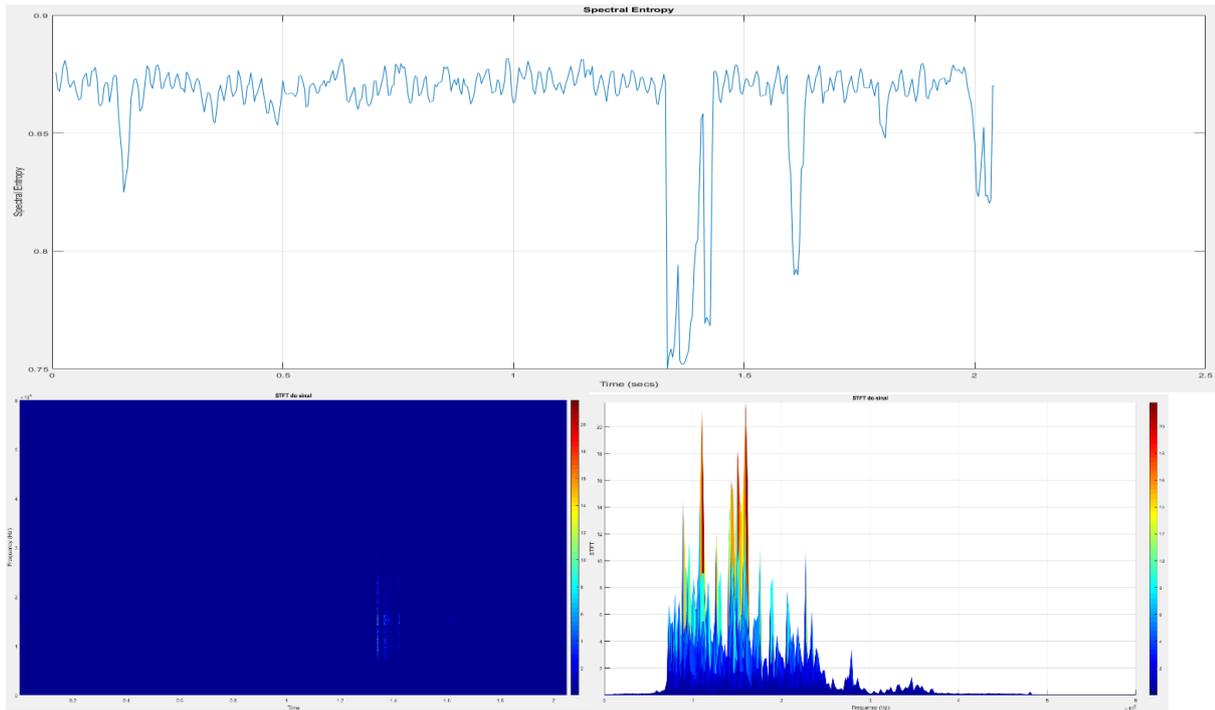
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 153 - Análise do sinal de EA no 163° ciclo – Falha 01**



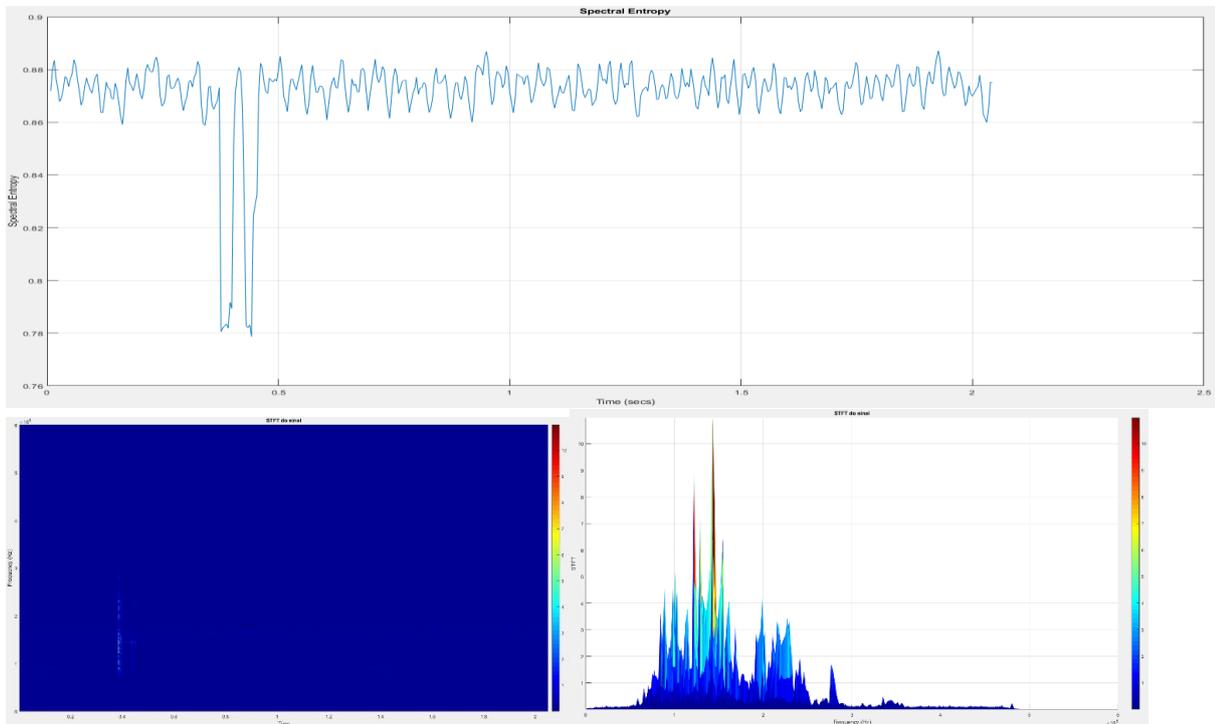
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 154 - Análise do sinal de EA no 170° ciclo – Falha 01**



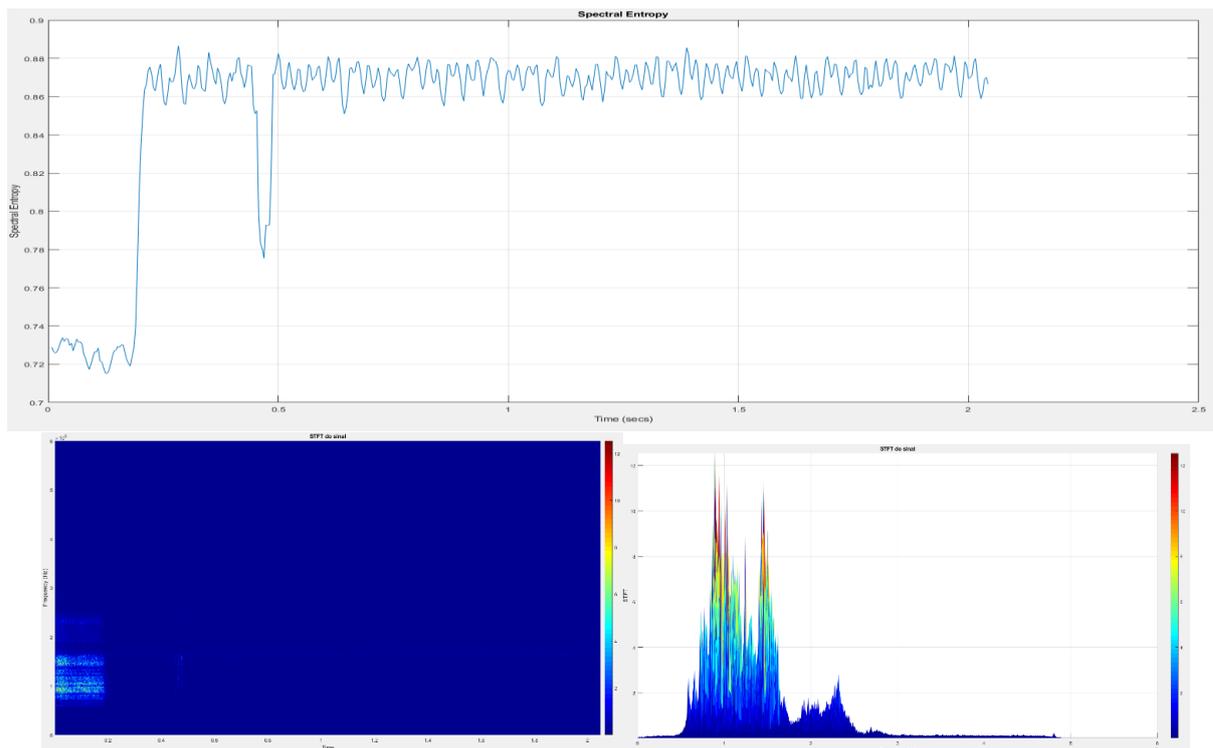
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 155 - Análise do sinal de EA no 275° ciclo – Falha 01**



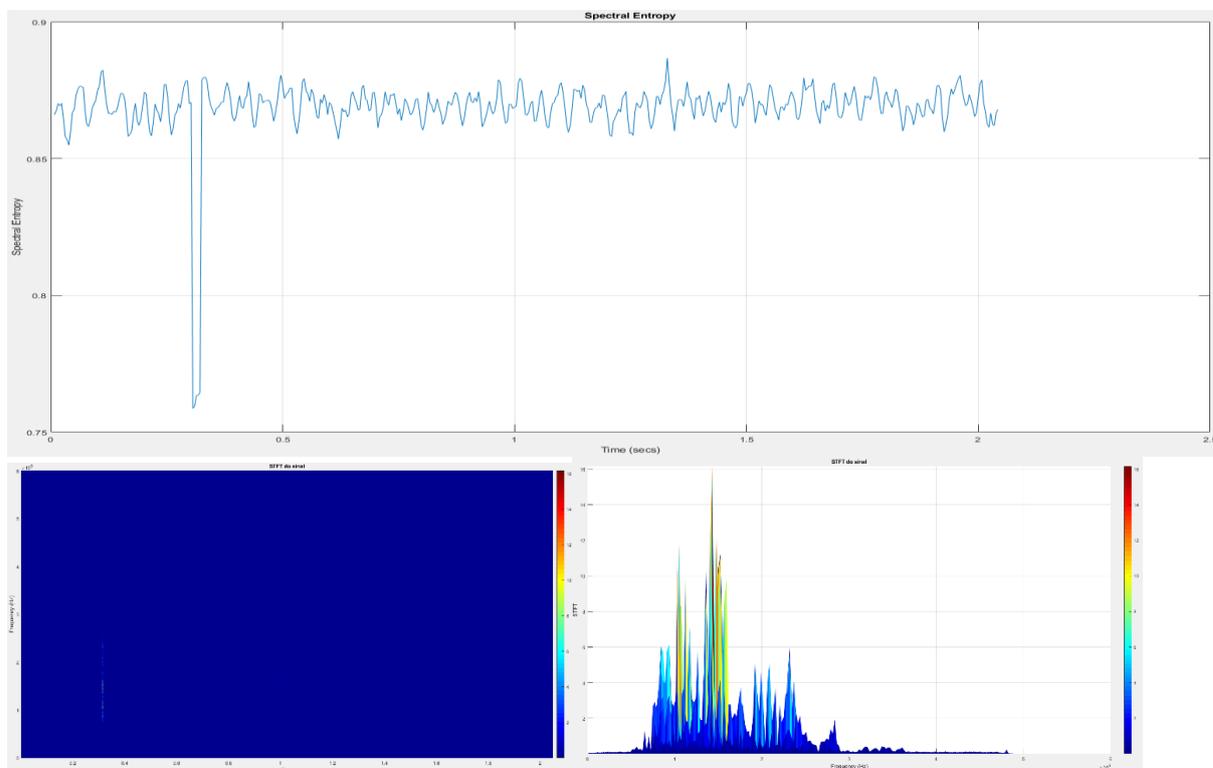
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 156 - Análise do sinal de EA no 421° ciclo – Falha 01**



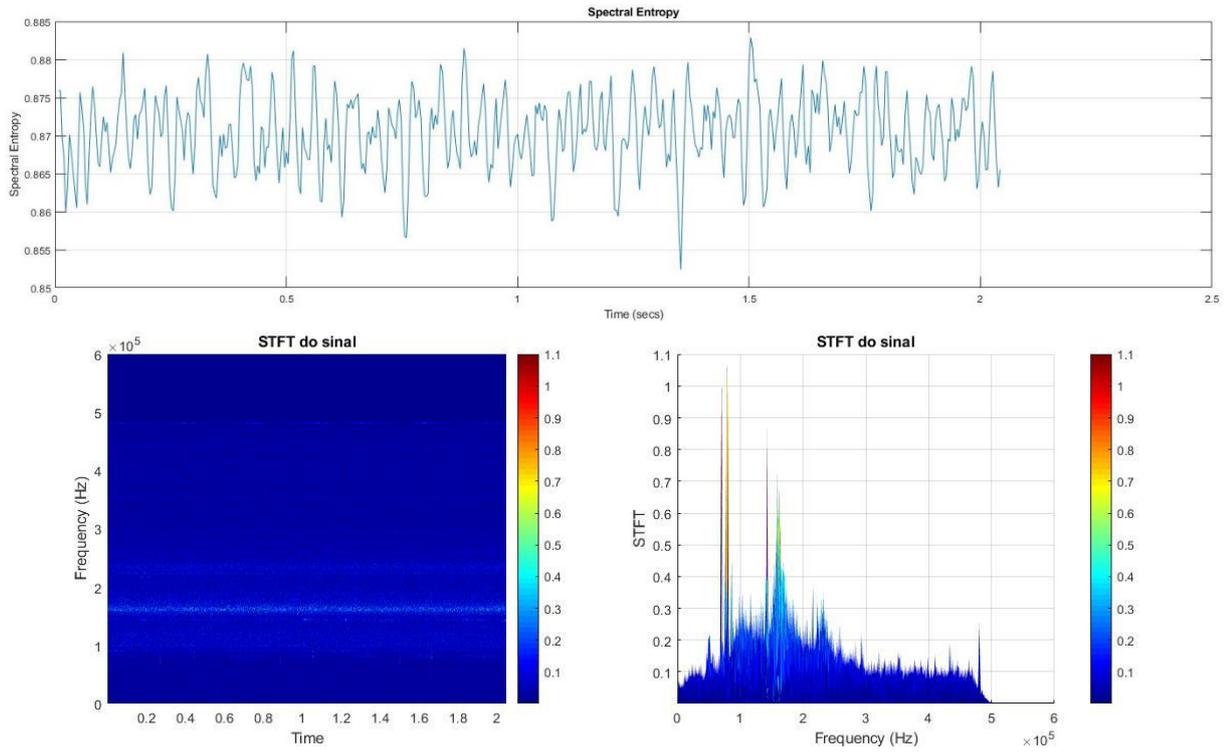
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 157 - Análise do sinal de EA no 519° ciclo – Falha 01**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

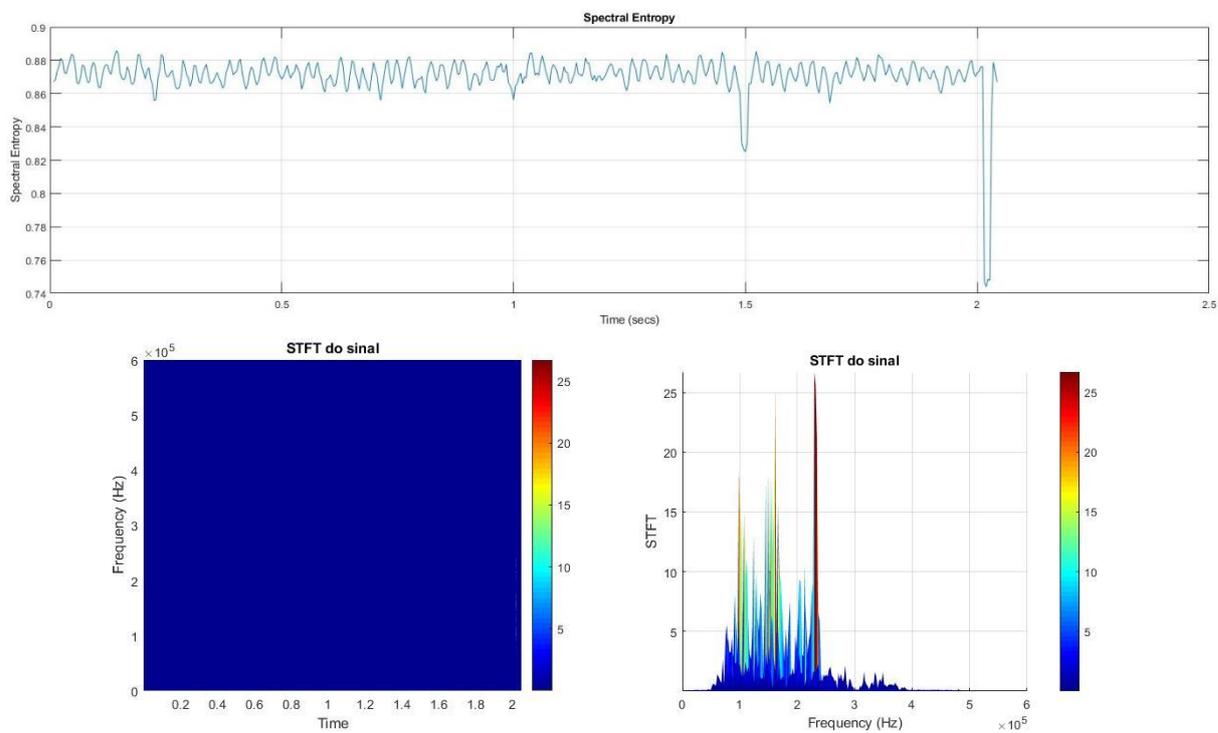
**Figura 158 - Análise do sinal de EA no 674° ciclo – Falha 01**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

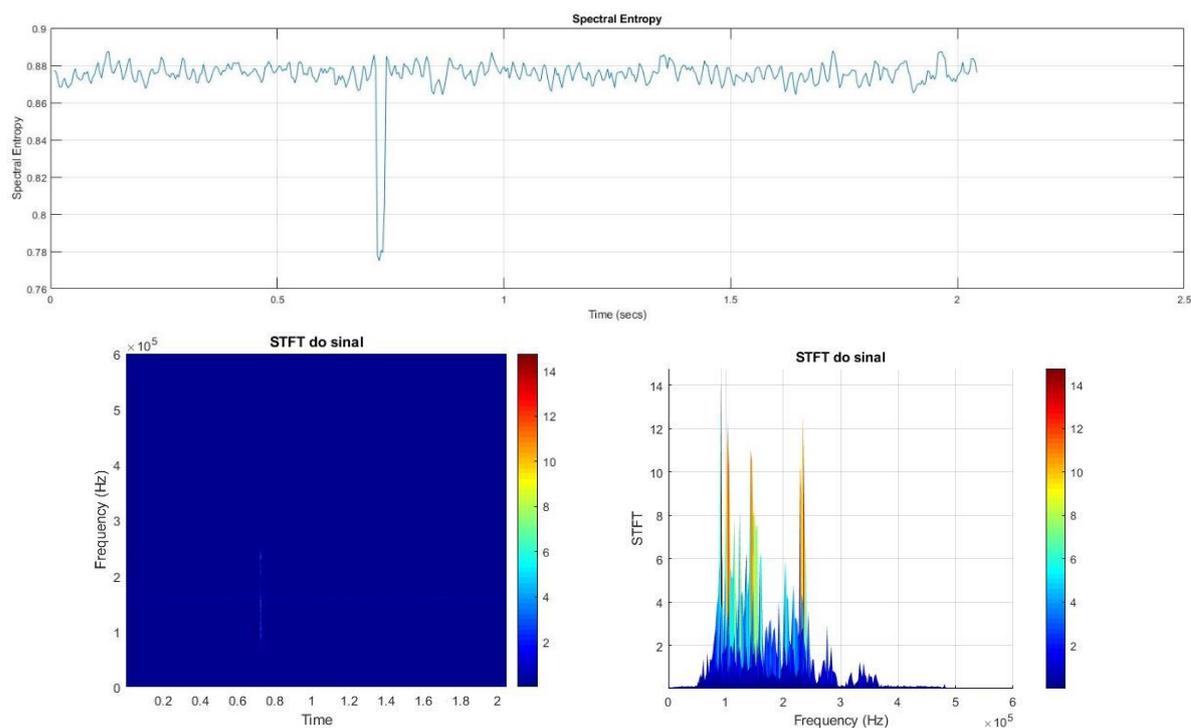
## APÊNDICE G – Complemento das análises da condição de Falha 02

**Figura 159 - Análise do sinal de EA no 192° ciclo – Falha 02**

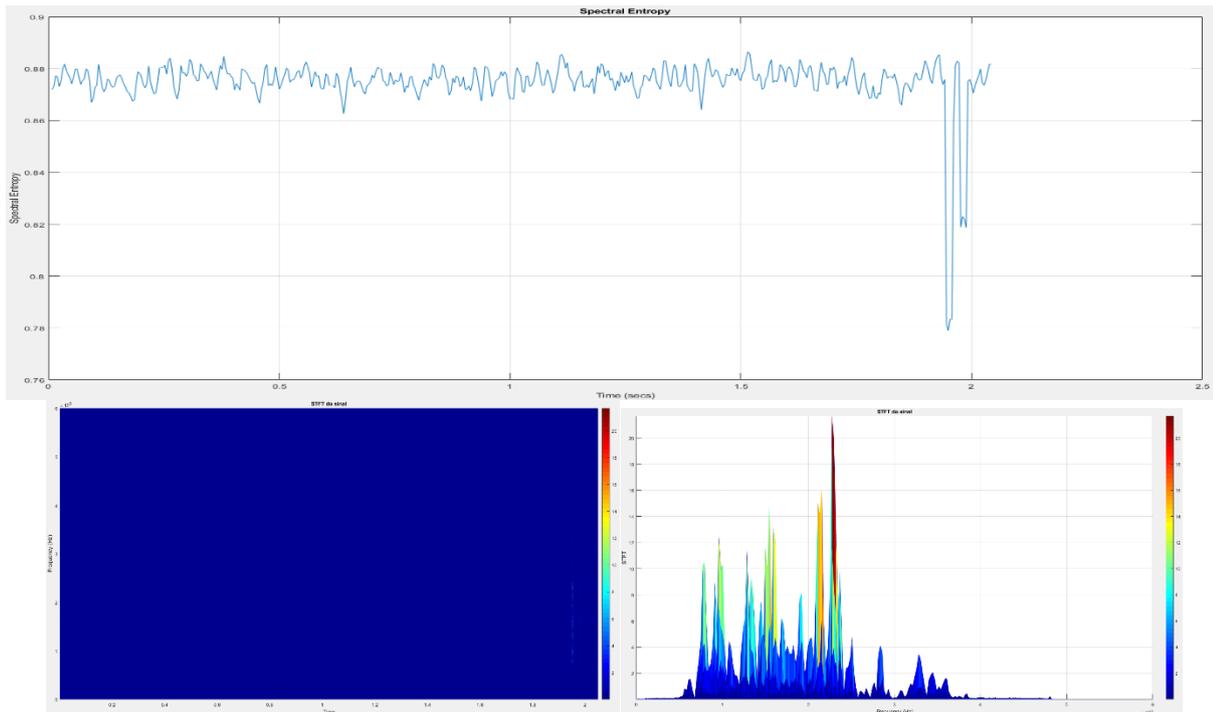


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

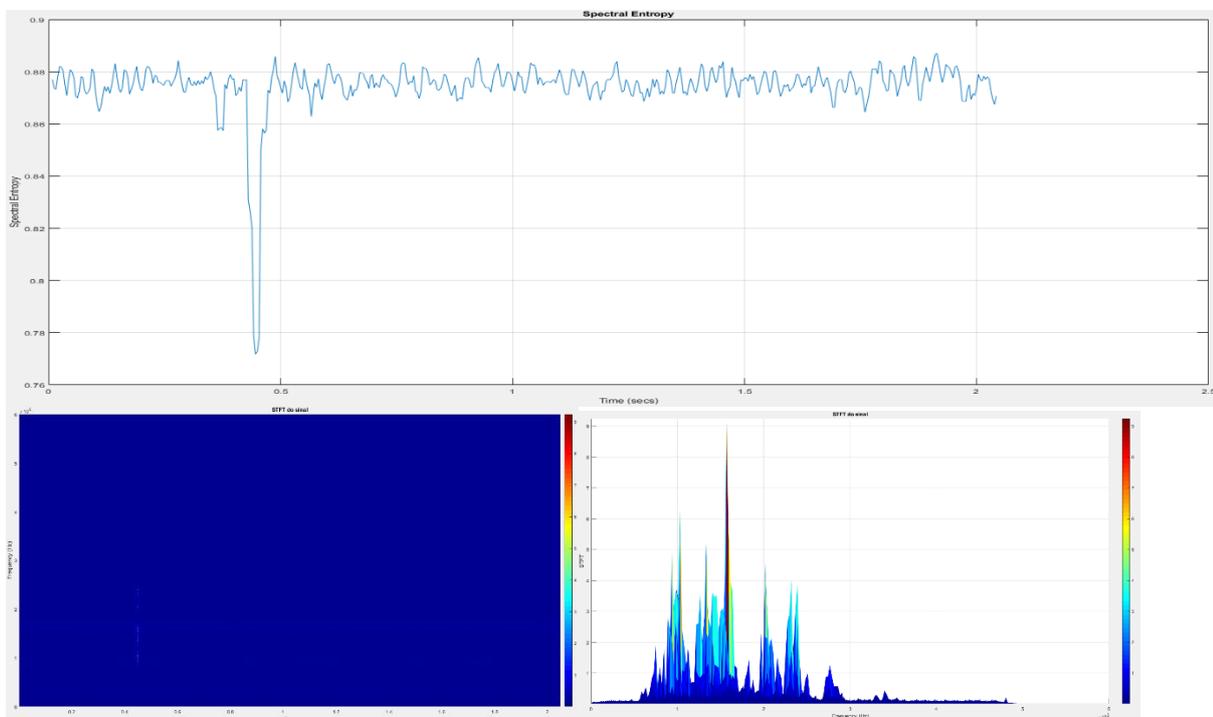
**Figura 160 - Análise do sinal de EA no 334° ciclo – Falha 02**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

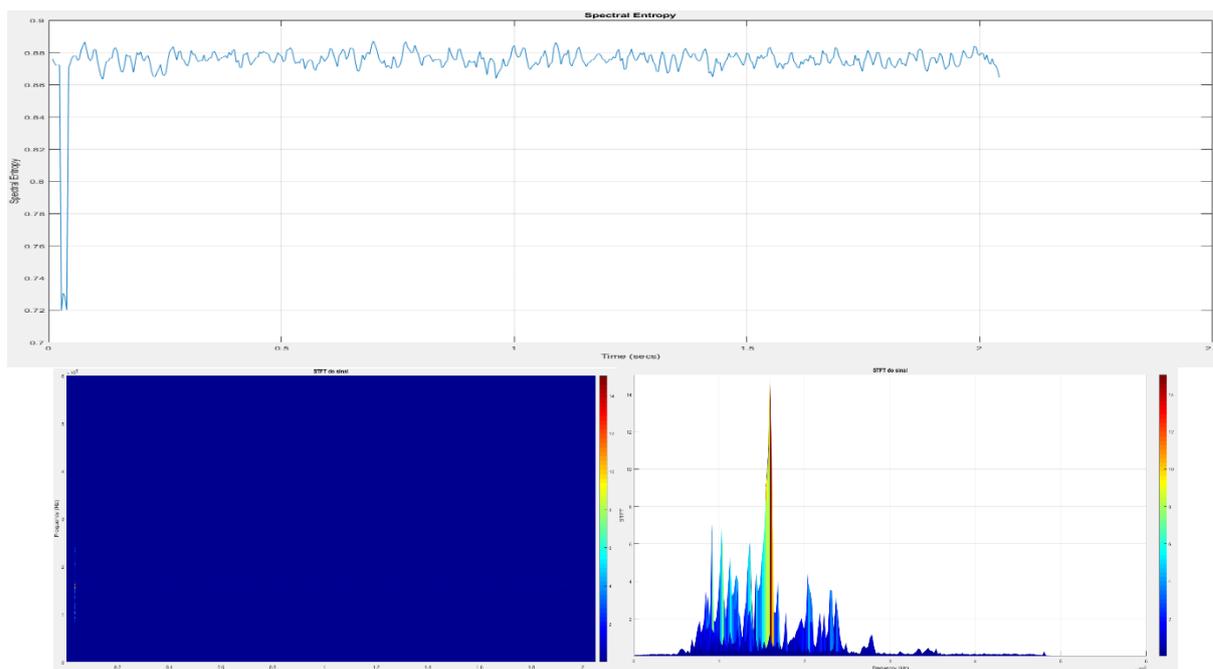
**Figura 161 - Análise do sinal de EA no 540° ciclo – Falha 02**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 162 - Análise do sinal de EA no 590° ciclo – Falha 02**

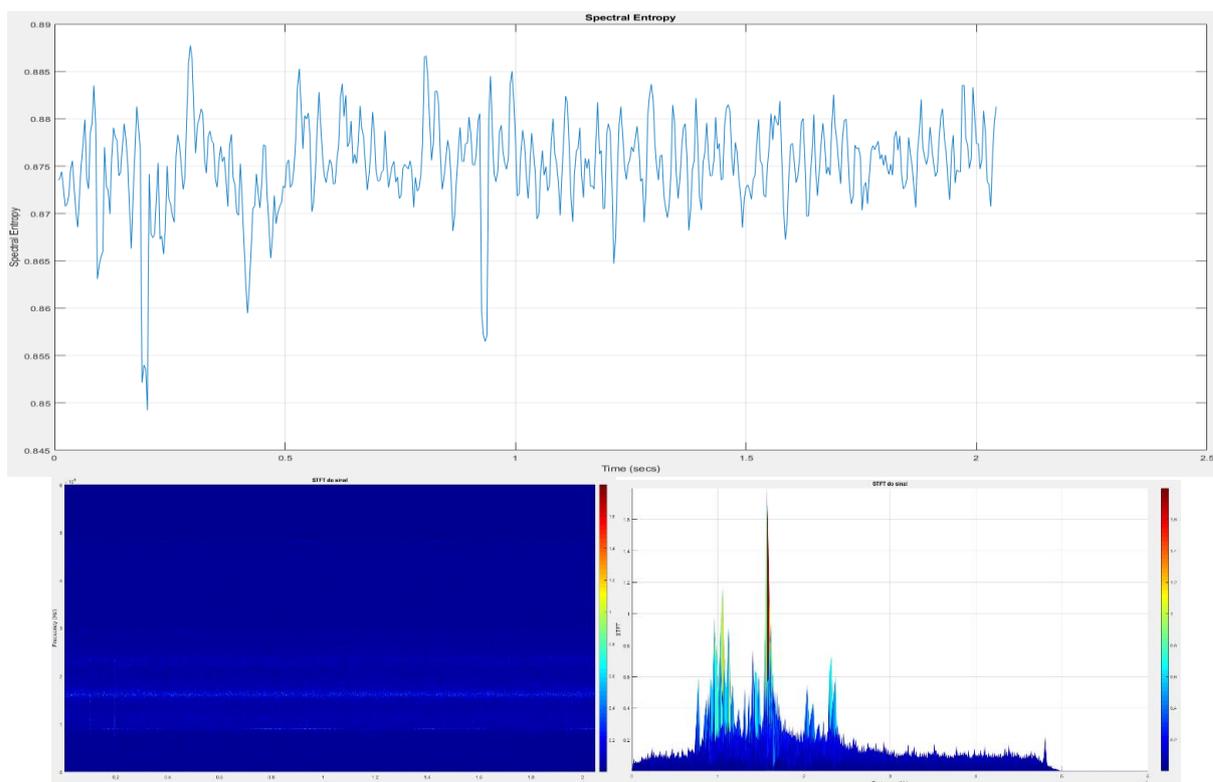
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 163 - Análise do sinal de EA no 607° ciclo – Falha 02**



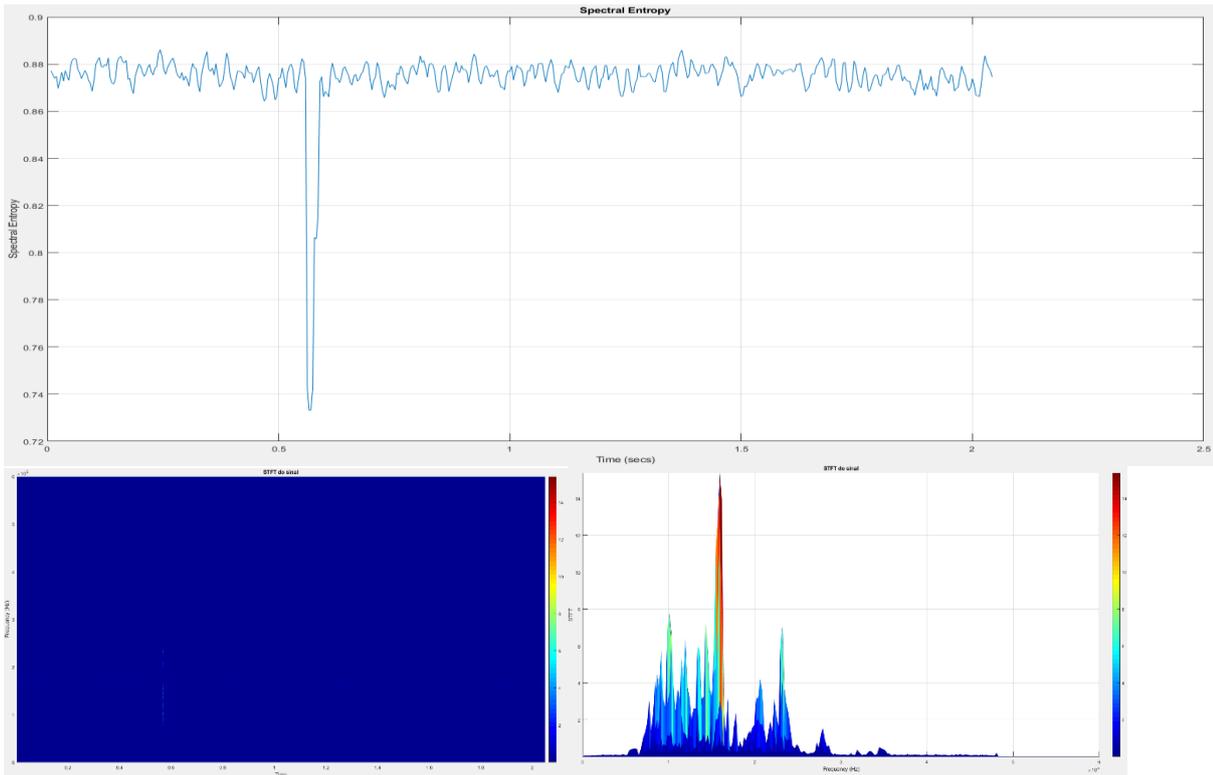
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 164 - Análise do sinal de EA no 614° ciclo – Falha 02**



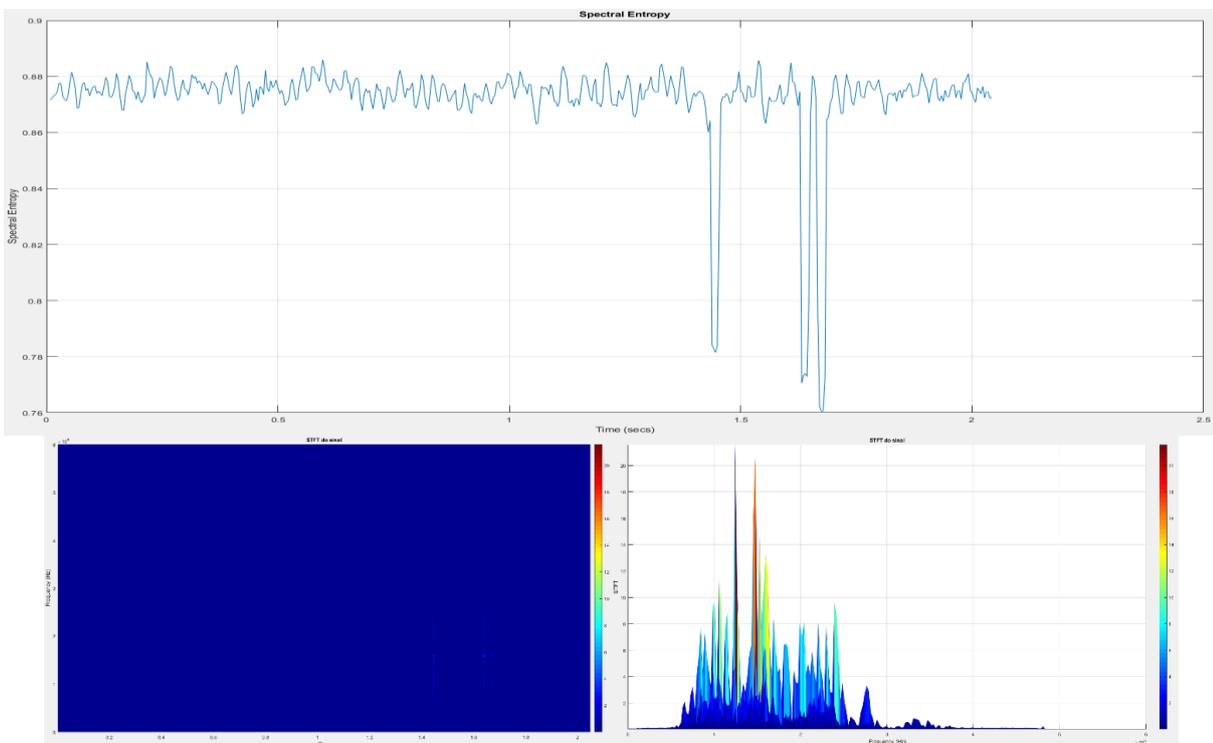
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 165 - Análise do sinal de EA no 647° ciclo – Falha 02**



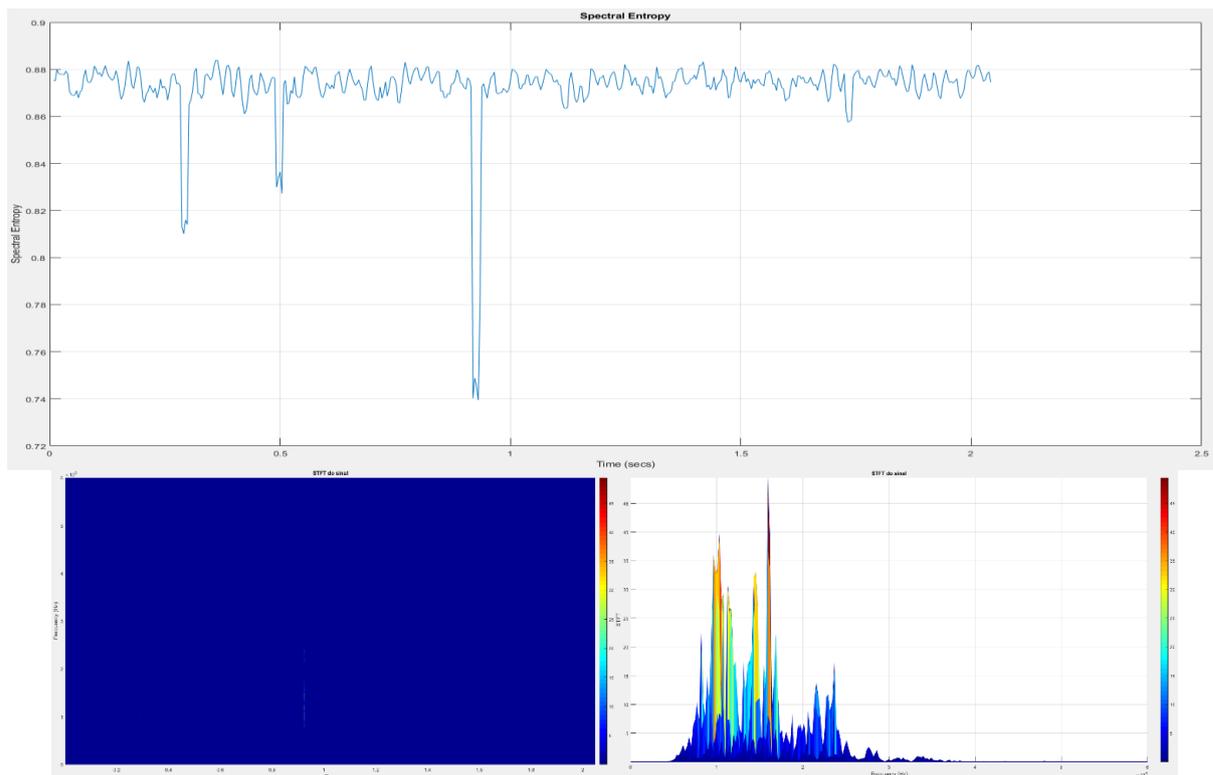
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 166 - Análise do sinal de EA no 672° ciclo – Falha 02**



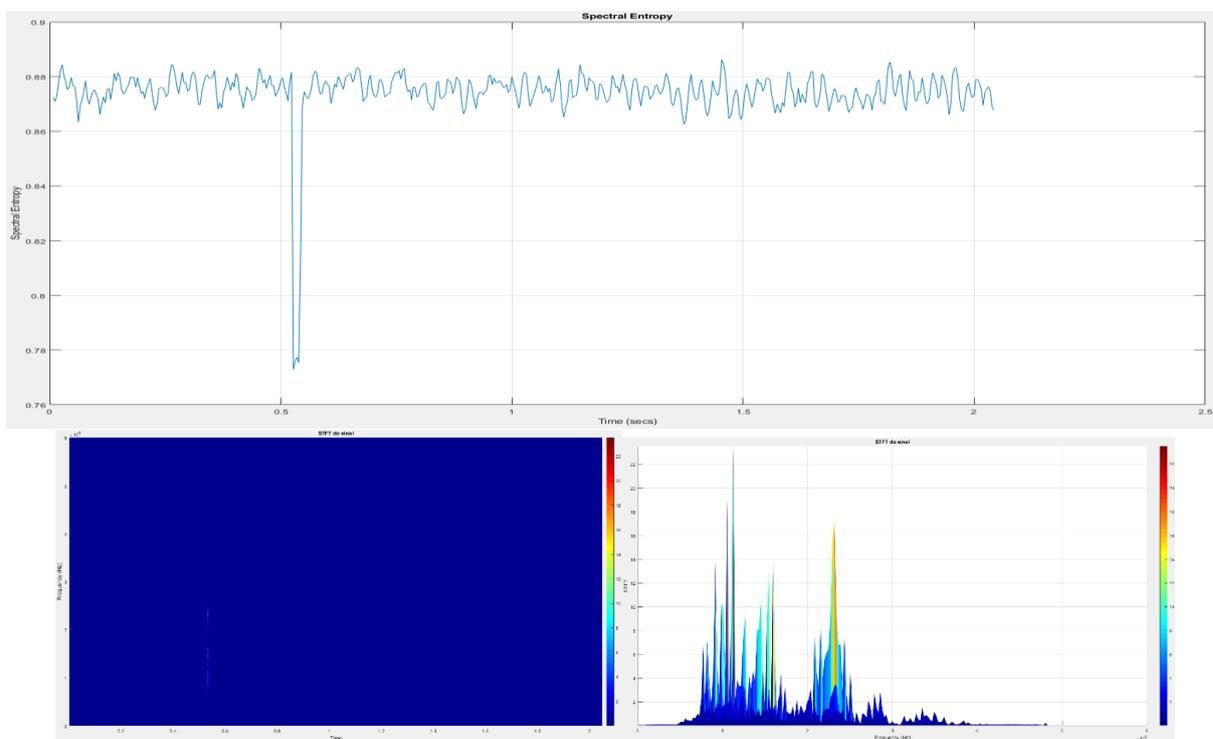
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 167 - Análise do sinal de EA no 684° ciclo – Falha 02**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 168 - Análise do sinal de EA no 707° ciclo – Falha 02

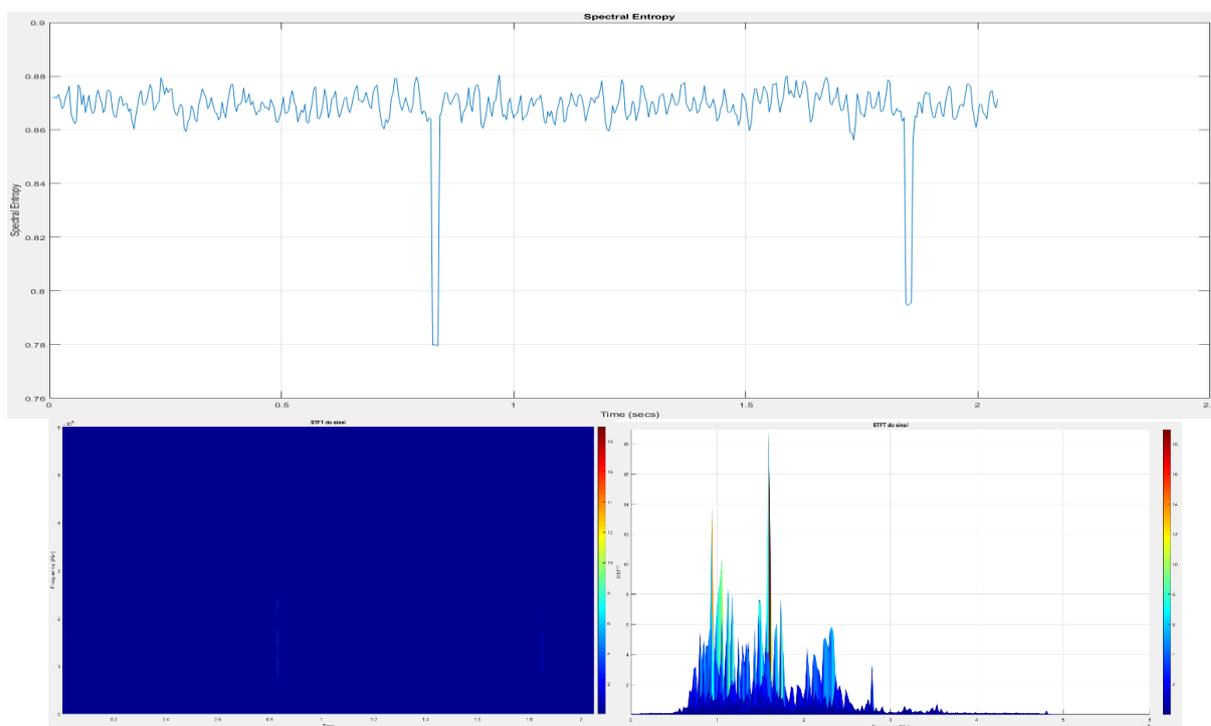


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)



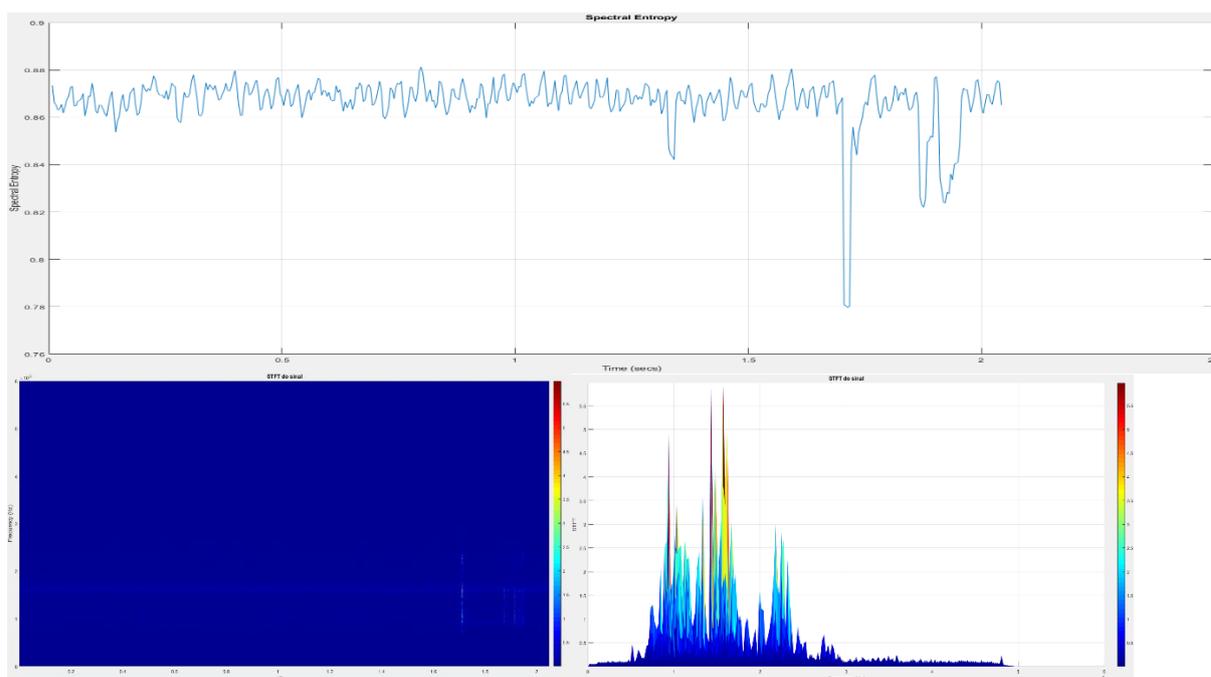
## APÊNDICE H – Complemento das análises da condição de Falha 03

Figura 169 - Análise do sinal de EA no 2º ciclo – Falha 03



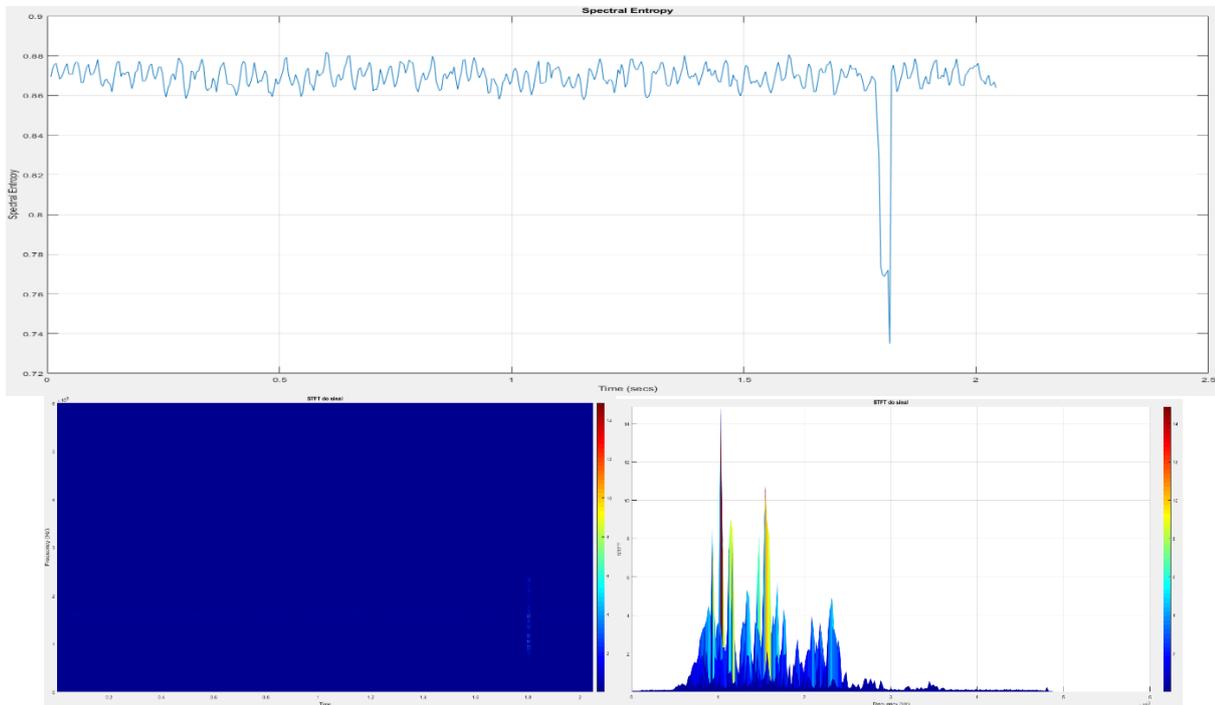
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 170 - Análise do sinal de EA no 8º ciclo – Falha 03



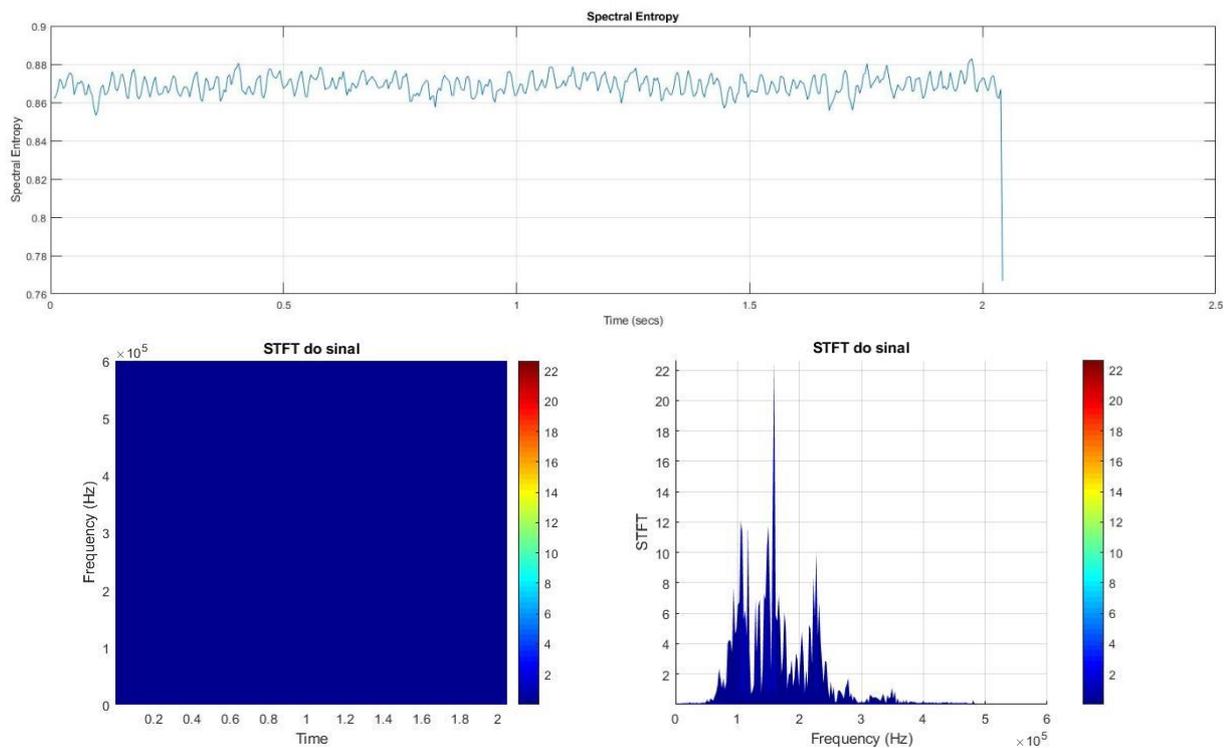
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 171 - Análise do sinal de EA no 45° ciclo – Falha 03**



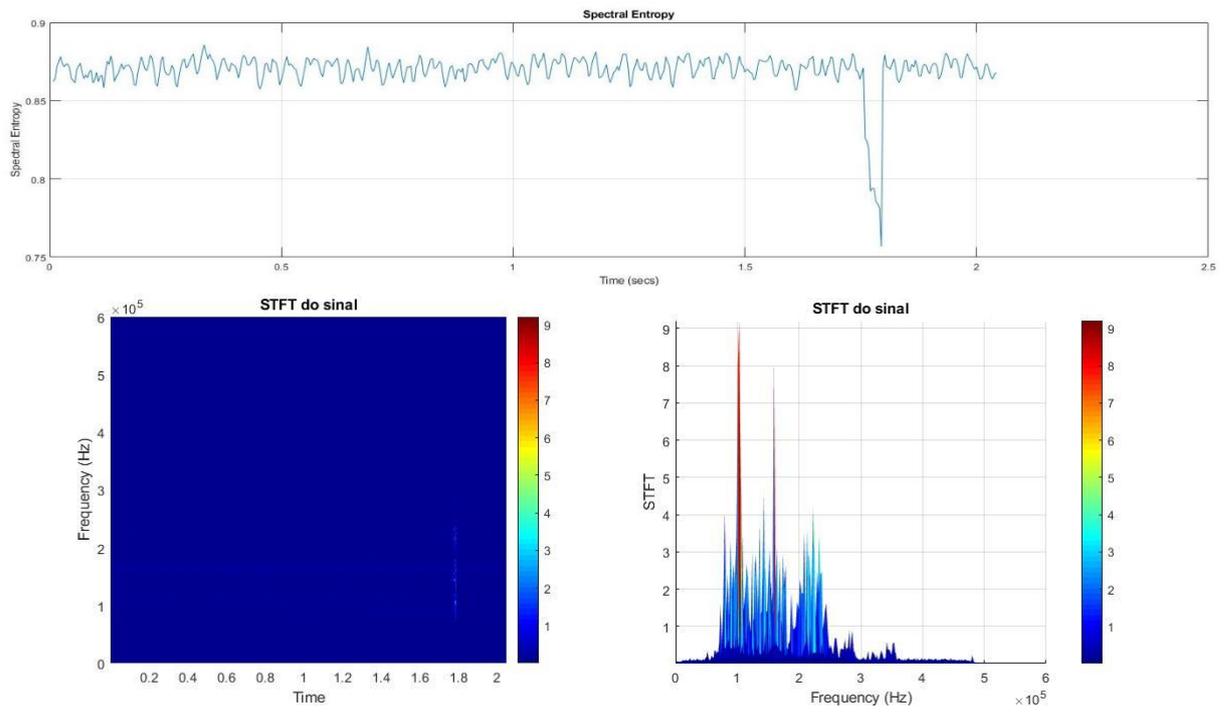
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 172 - Análise do sinal de EA no 213° ciclo – Falha 03**



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 173 - Análise do sinal de EA no 501° ciclo – Falha 03**

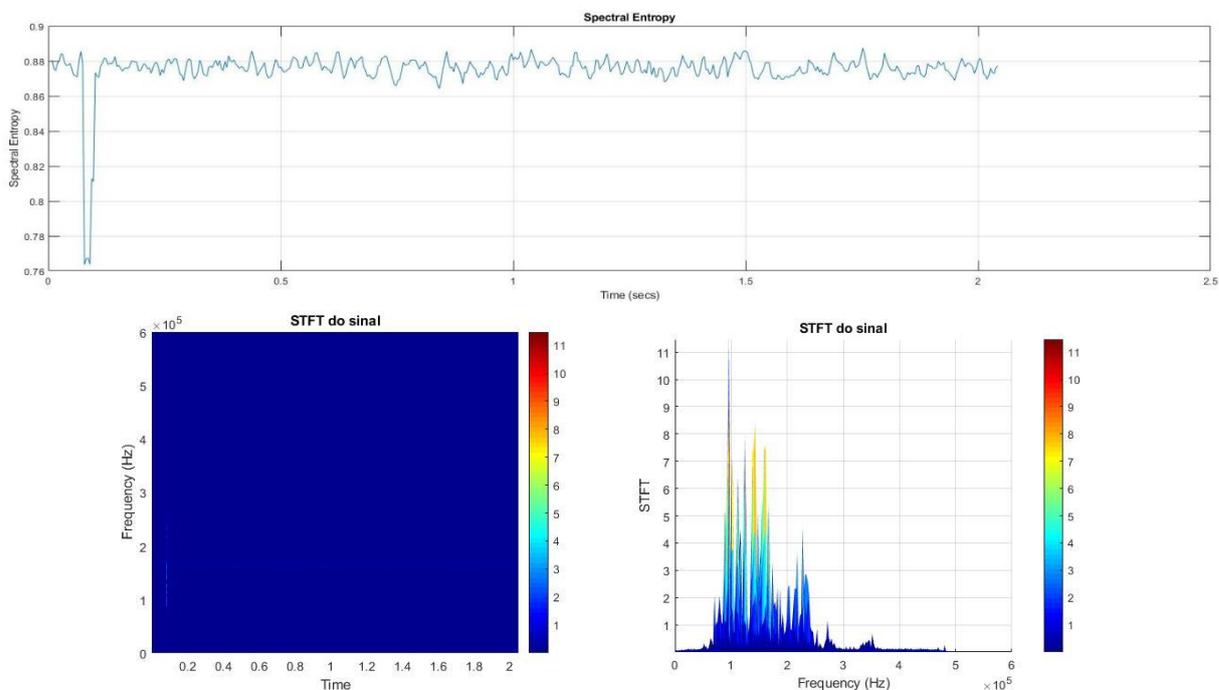


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)



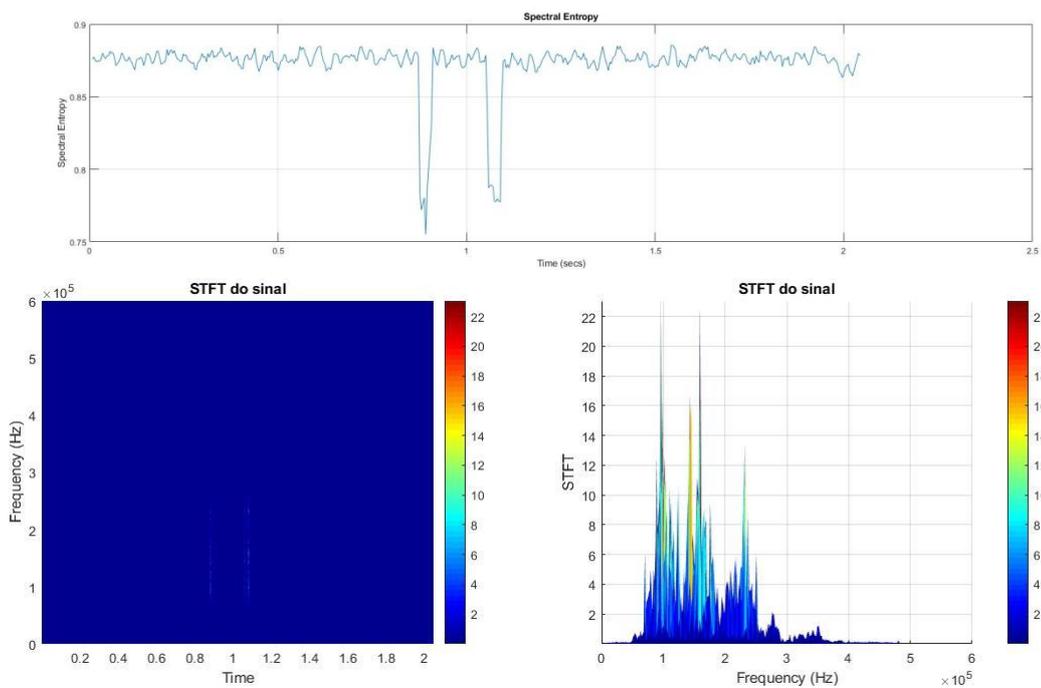
## APÊNDICE I – Complemento das análises da condição de Falha 04

**Figura 174 - Análise do sinal de EA no 66° ciclo – Falha 04**

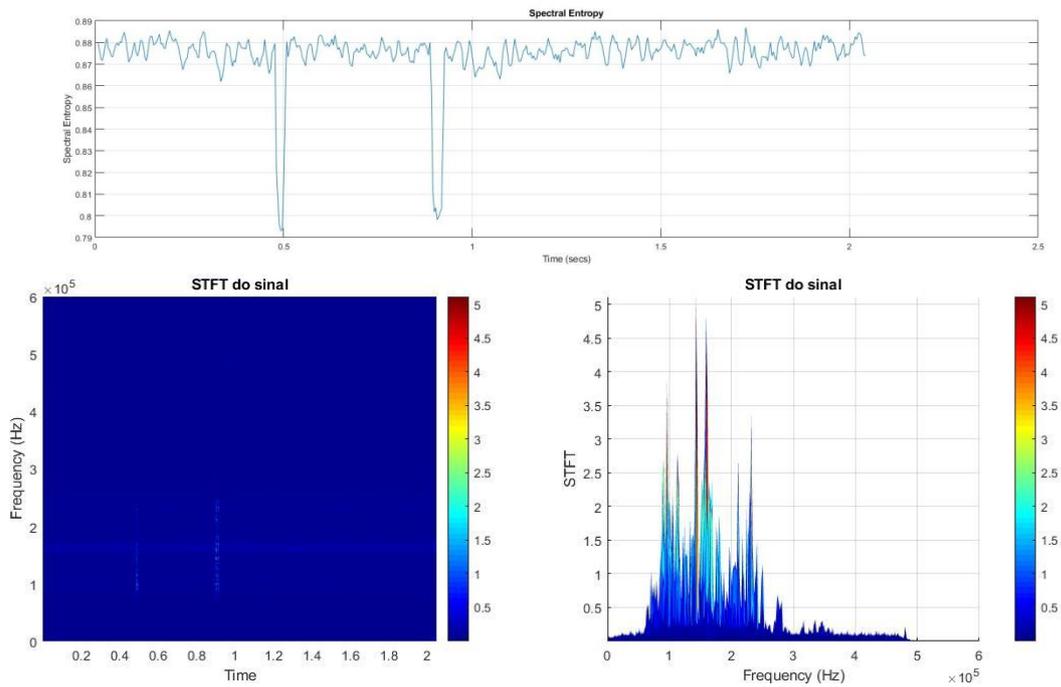


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

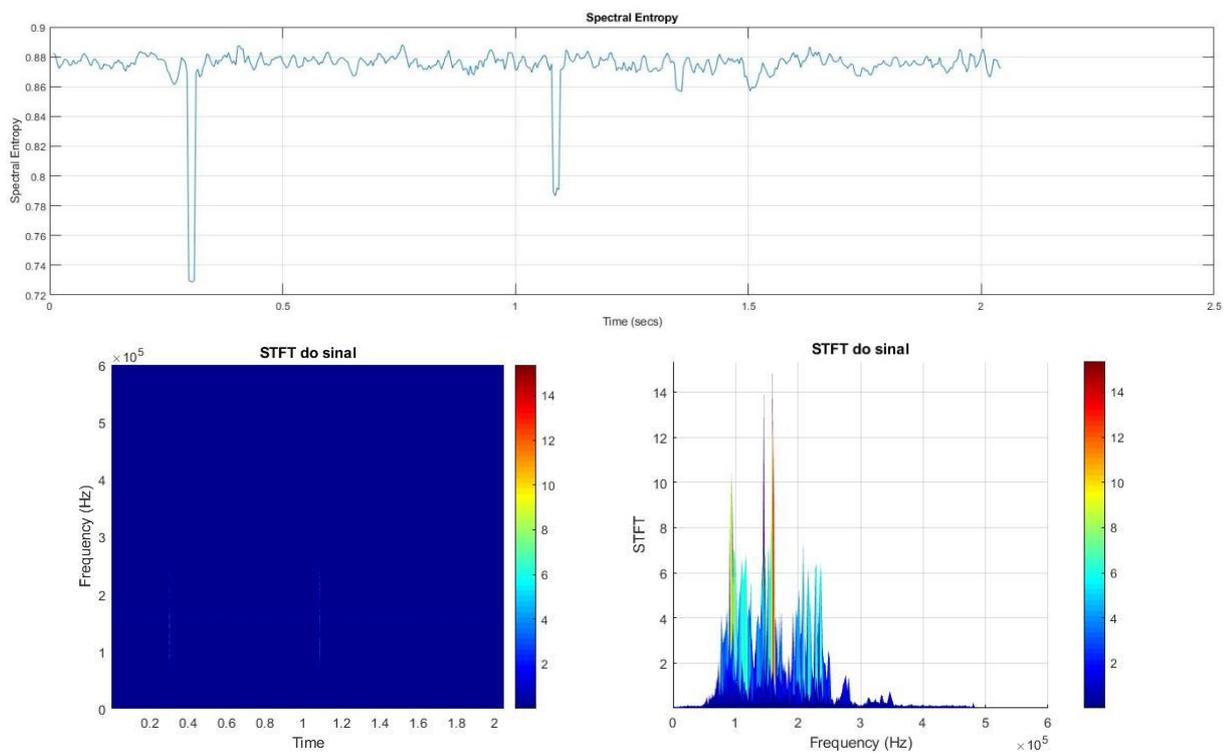
**Figura 175 - Análise do sinal de EA no 121° ciclo – Falha 04**



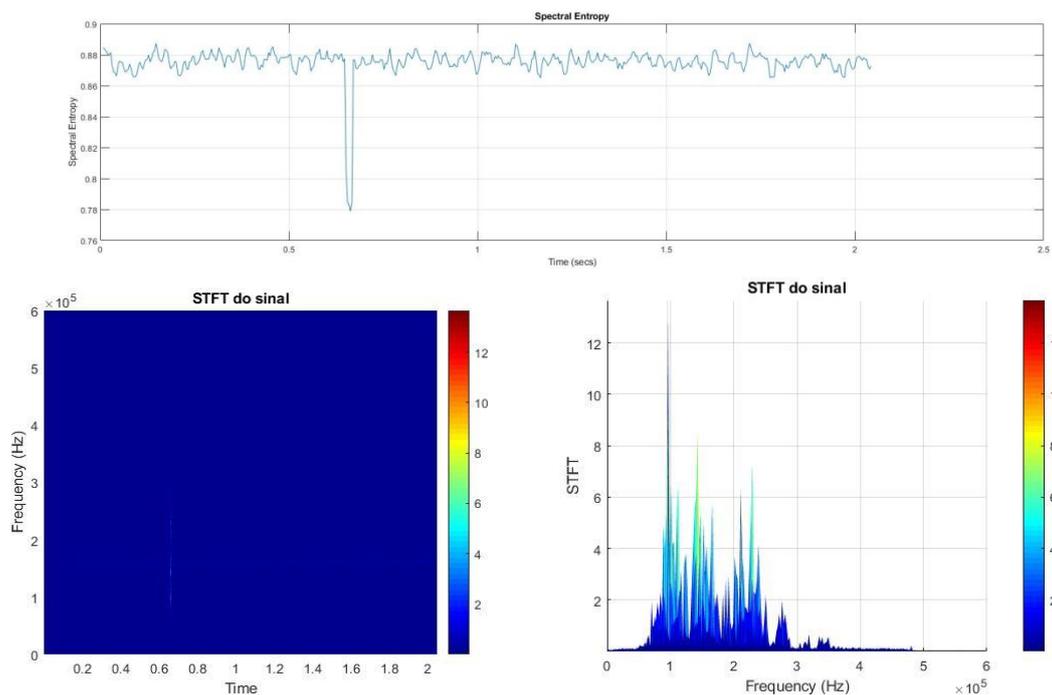
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 176 - Análise do sinal de EA no 123° ciclo – Falha 04**

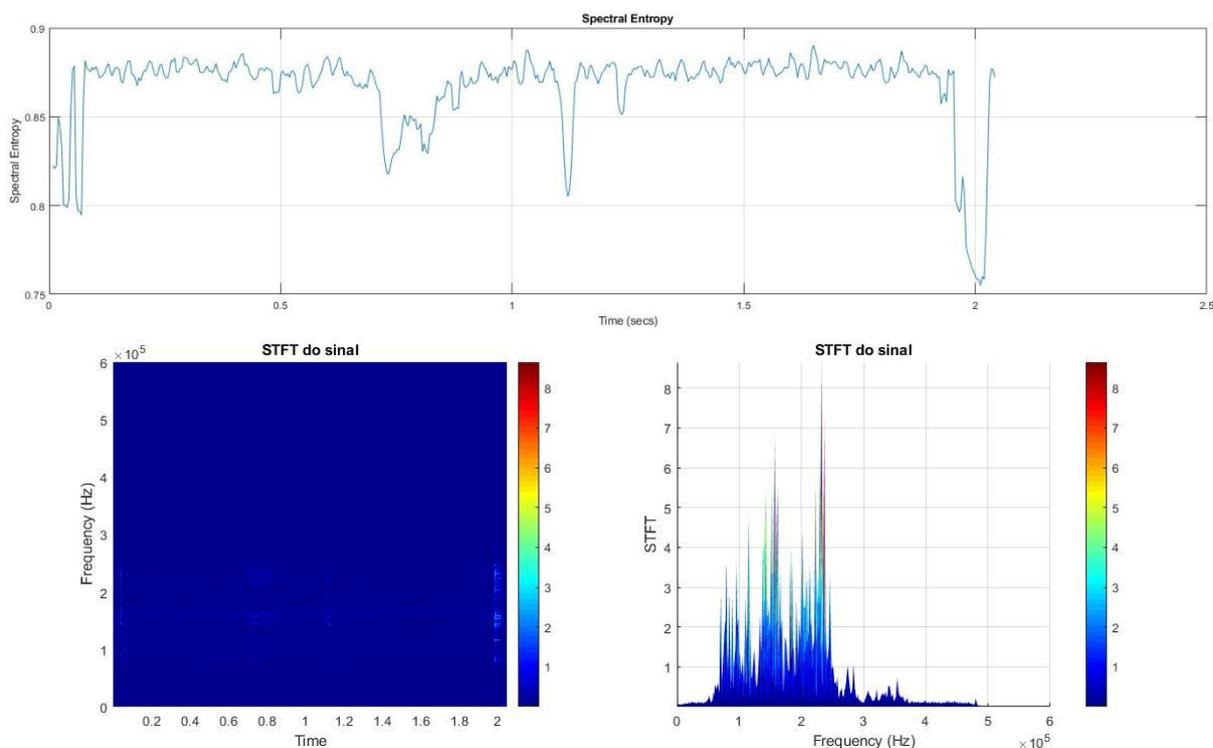
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 177 - Análise do sinal de EA no 129° ciclo – Falha 04**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

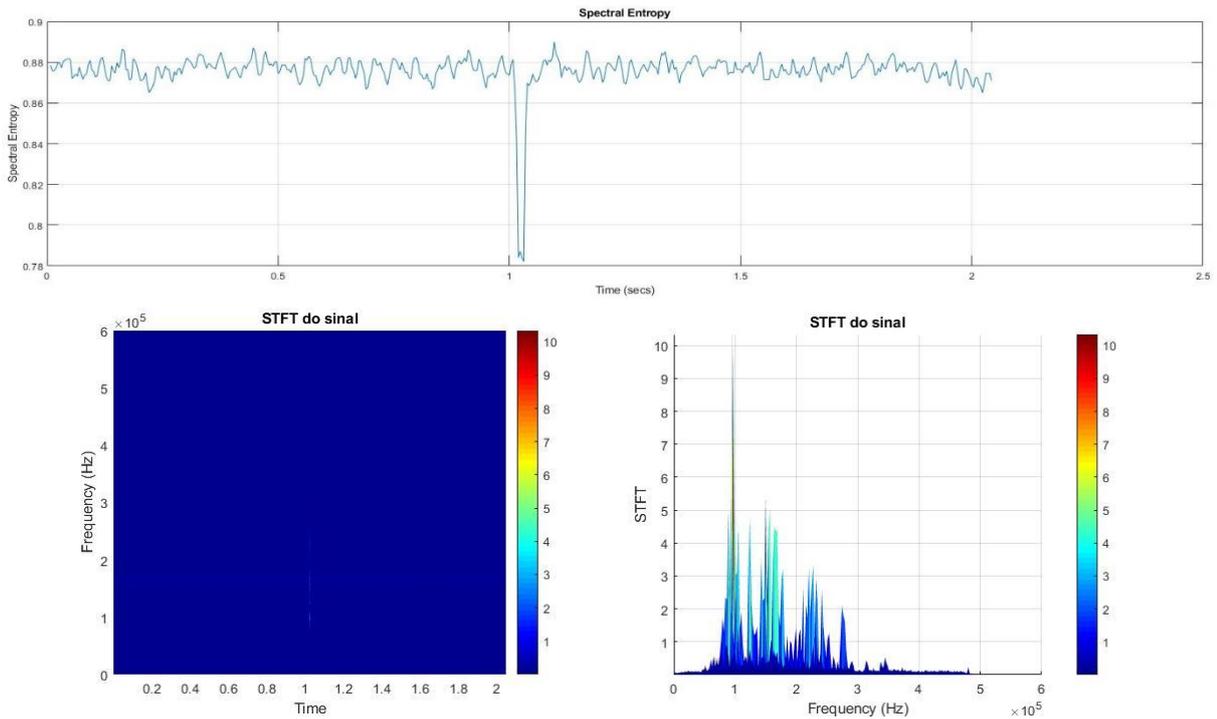
**Figura 178 - Análise do sinal de EA no 179° ciclo – Falha 04**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 179 - Análise do sinal de EA no 188° ciclo – Falha 04**

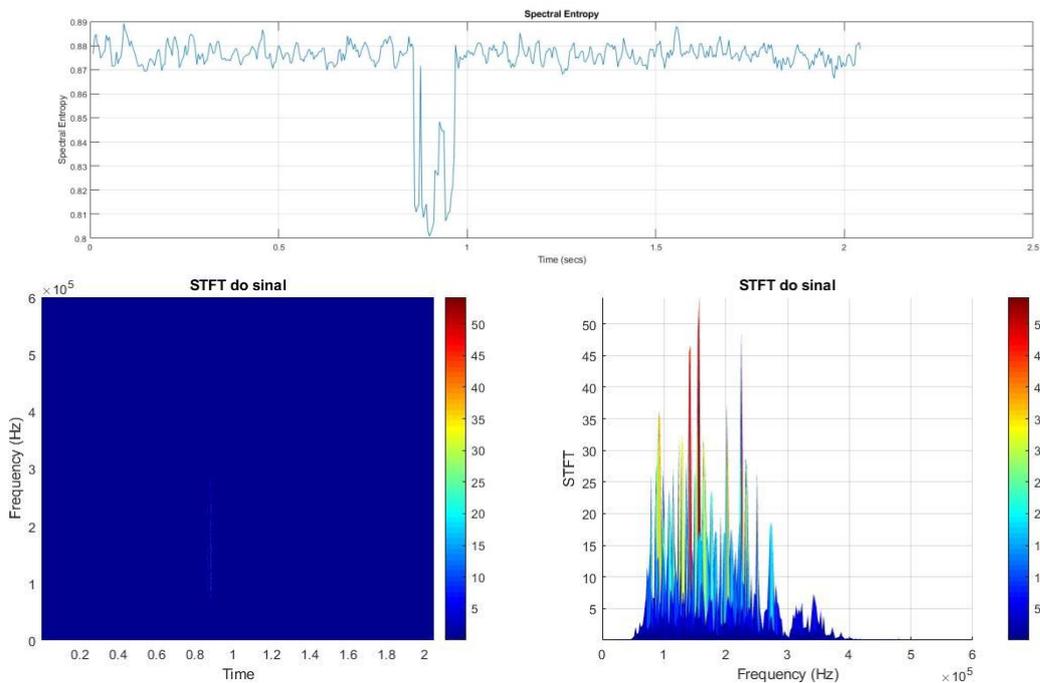
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

**Figura 180 - Análise do sinal de EA no 283° ciclo – Falha 04**



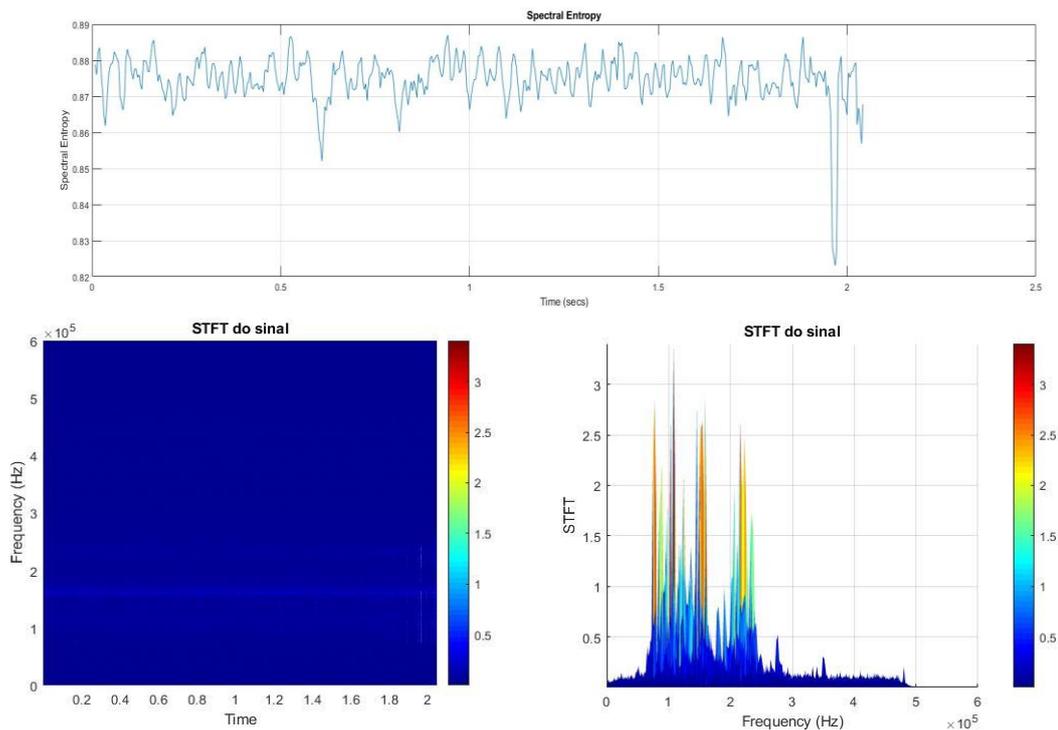
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 181 - Análise do sinal de EA no 389° ciclo – Falha 04



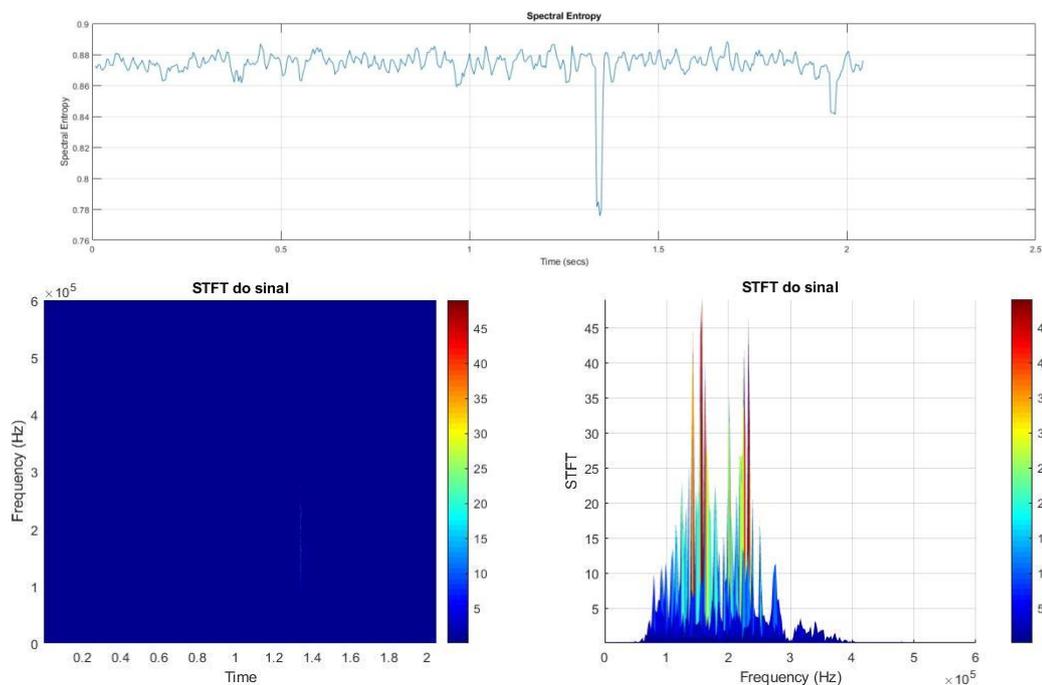
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 182 - Análise do sinal de EA no 396° ciclo – Falha 04



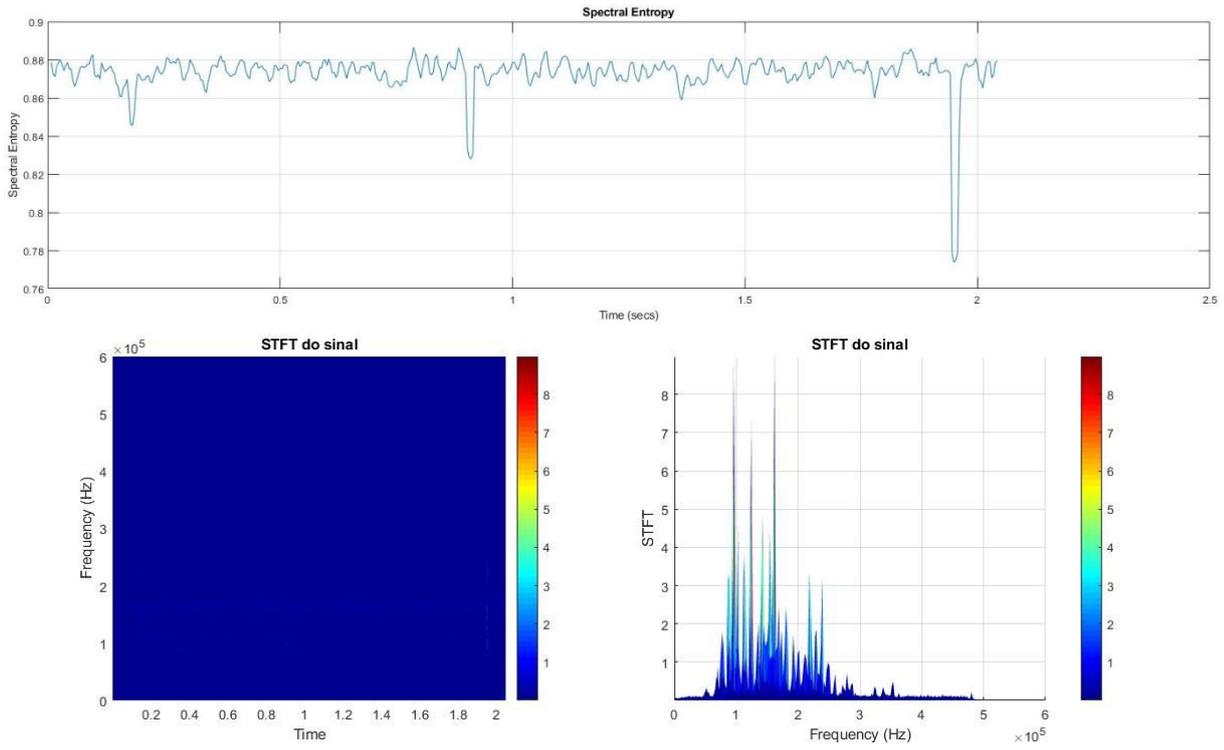
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 183 - Análise do sinal de EA no 397° ciclo – Falha 04



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 184 - Análise do sinal de EA no 495° ciclo – Falha 04



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)