

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

HUEDERSON APARECIDO BOTURA DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE 915 MHZ PARA
MONITORAMENTO E SUPERVISÃO DE
ISOLADORES POLIMÉRICOS CLASSE DE TENSÃO
DE 500 KV**

CAMPINAS

2012

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

GRÃO-CHANCELER

Dom Airton José dos Santos

MAGNÍFICA REITORA

Prof. Dra. Angela de Mendonça Engelbrecht

VICE-REITOR

Prof. Dr. Eduard Prancic

PRÓ-REITORA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dra. Vera Engler Cury

**DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

Prof. Ricardo Luís de Freitas

**COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO DE REDES DE
TELECOMUNICAÇÕES**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GESTÃO DE REDES E SERVIÇOS

Prof. Dr. Marcelo Luis Francisco Abbade

HUEDERSON APARECIDO BOTURA DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE 915 MHZ PARA
MONITORAMENTO E SUPERVISÃO DE
ISOLADORES POLIMÉRICOS CLASSE DE TENSÃO
DE 500 KV**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota

PUC CAMPINAS

2012

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação – SBI – PUC-Campinas

t621.31937
S586u

Silva, Huederson Aparecido Botura da
Utilização da frequência de 915 MHz para monitoramento e
supervisão de isoladores poliméricos classe de tensão de 500 kV /
Huederson Aparecido Botura da Silva. - Campinas: PUC-Campinas, 2012.
273p.

Orientador: Alexandre de Assis Mota.
Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de
Campinas, Centro de Ciências Ambientais e de Tecnologias, Pós-
Graduação em Gestão de Redes e Telecomunicações.
Inclui bibliografia.

1. Isoladores e isolamentos elétricos. 2. Materiais isolantes. 3. Sis-
temas de energia elétrica. I. Mota, Alexandre Assis. II. Pontifícia
Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Ambientais e de
Tecnologias. Pós-Graduação em Gestão de Redes e Telecomuni-
cações. III. Título.

22.ed. CDD – t621.31937

HUEDERSON APARECIDO BOTURA DA SILVA

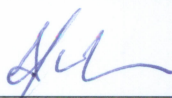
**UTILIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE 915 MHZ PARA
MONITORAMENTO E SUPERVISÃO DE ISOLADORES
POLIMÉRICOS CLASSE DE TENSÃO DE 500 KV**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

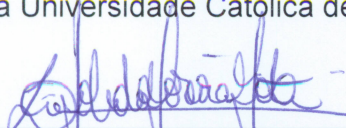
Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviços.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota.

Dissertação defendida e aprovada em 07 de dezembro de 2012 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof.ª Dr.ª Lia Toledo Moreira Mota
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Mauro Donizeti Berni
Universidade Estadual de Campinas

A Deus por sempre iluminar meu caminho indicando meu futuro e por me dar força para
mais essa etapa de estudos.
Aos meus pais, Regina e João Batista por sempre me apoiar e me incentivar.
A minha irmã Leticia que sempre me alegra e me mostra como a vida pode ser simples.
À minha namorada Fernanda, pela paciência, compreensão me apoiando e me dando
forças.
Aos meus amigos que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Alexandre de Assis Mota
Meu orientador, e grande responsável na realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Mauricio Valencia Ferreira da Luz
Meu mestre e professor na utilização dos programas de simulação Gmsh e GetDP.

Ao futuro Dr. Emílio Rodolfo Arend
Meu professor na utilização dos programas Gmsh e GetDP.

Ao Professor Dr. Omar Carvalho Branquinho
Pelo auxílio na realização dos experimentos utilizando sensores.

À Professora Dra. Lia Toledo Moreira Mota
Pelo auxílio no estudo da modelagem matemática.

Ao Professor Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade
Professor e coordenador do Programa de Mestrado da PUC-Campinas.

Ao Professor Dr. David Bianchini
Professor do Programa de Mestrado da PUC-Campinas.

Aos colegas graduandos em especial ao Edson Taira, por ser um dos responsáveis por eu ter realizado este curso.

À Industria Eletromecanica Balestro Ltda.
Por permitir realizar este trabalho utilizando um de seus produtos, além de usufruir de seu laboratório.

Ao Engenheiro Ricardo Borges de Oliveira
Encarregado de laboratório na Balestro e responsável por realizar os ensaios elétricos contidos neste trabalho.

E a todos que de forma direta ou indireta proporcionaram a realização deste trabalho.

“Há três coisas que nunca voltam atrás:
A flecha lançada,
A palavra pronunciada
E a oportunidade perdida”.
Provérbio chinês

RESUMO

DA SILVA, Huederson Aparecido Botura. *Utilização da frequência de 915 MHz para monitoramento e supervisão de isoladores poliméricos classe de tensão de 500 kV*. 273f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campinas, 2012.

Em um sistema de transmissão de energia elétrica, os isoladores estão diretamente associados ao nível de segurança da rede, na qual sua falha influencia em indicadores das concessionárias. Os isoladores poliméricos estão adquirindo com o passar dos anos maior utilização, sendo que possui inúmeras vantagens perante seus concorrentes (vidro e/ou porcelana), entretanto sua vida útil ainda não pode ser determinada.

Este trabalho aborda a utilização da frequência livre de 915 MHz para monitoramento e supervisão destes isoladores poliméricos, sendo possível assim fornecer dados sobre a rede bem como indicando a sua vida útil. Foi realizado uma transmissão de dados mediante variações da intensidade do campo elétrico decorrentes do terminal fase do isolador da classe de tensão de 500 kV. A variação da intensidade do campo elétrico foi obtido utilizando anéis anti-corona diferentes, sendo seus valores obtidos através de simulações utilizando os *softwares* Gmsh e GetDP que utiliza o método dos elementos finitos. Foi possível observar que a frequência central da portadora não teve variação quando o sinal passava pelo campo elétrico, além de ser possível realizar a comunicação entre os nós sensores tendo, na configuração mais crítica, uma perda de pacotes igual a 1,6 %. Também foi possível observar que para todos os ensaios realizados ocorreu pequena degradação do sinal durante a transmissão de dados.

Termos de indexação: campo elétrico, isolador polimérico, frequência 915 MHz, *smart-grid*, Gmsh

ABSTRACT

DA SILVA, Huederson Aparecido Botura. *Utilização da frequência de 915 MHz para monitoramento e supervisão de isoladores poliméricos classe de tensão de 500 kV*. 273f. Dissertation (Master in Telecommunications Networks Management) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campinas, 2012.

In an electric power transmission system, the insulators are directly associated with the security level of the web, which your fail influence on companies statistics. The polymeric insulators are become more utilized year after year, having numerous advantages to its competitors (glass and/ or porcelain), however, its useful life can not be determined yet.

This paper discuss the use of the free frequency of 915 MHz for monitoring and supervision of this polymeric insulators, and can thus provide data about the web , as well, indicate its useful live. Was performed a data transmission with variations of the intensity of electric fields resulting from the line fitting of the 500kV rated voltage insulator. The variation of the electric field was obtained using different anti-corona rings. Its values were obtained using software as Gmsh and GetDP which use the method of finites elements. Was possible to observe that the central frequency of the carrier did not change when a sign passed throw the electric field, besides being possible to perform the communication between the sensors having, at the most critical configuration, a packet loss equal to 1,6%. Also was possible observed that for all tests performed occurred a small degradation of the sign during the data transmission.

Indexing terms: field eletric, isolator polimeric, frequency 915 MHz, smart-grid, Gmsh

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Campo elétrico formado por uma carga positiva (FILHO, 2008).</i>	36
<i>Figura 2. Campo elétrico formado por uma carga negativa (FILHO, 2008).</i>	36
<i>Figura 3. Linhas equipotenciais do campo elétrico formado por uma carga positiva (MENDES, 2012).</i>	37
<i>Figura 4. Densidade de fluxo entre as duas esferas (BELMIROW, 2012).</i>	38
<i>Figura 5. Representação gráfica das linhas de indução de um ímã (MARQUES, 2002).</i>	40
<i>Figura 6. Campo magnético de um ímã (MARTINS, 2004).</i>	40
<i>Figura 7. Comportamento dos polos de um ímã (ELEKTRON JUVENIL, 2012).</i>	41
<i>Figura 8. Ilustração da bússola e os polos da Terra (PORTAL SÃO FRANCISCO, 2012).</i>	41
<i>Figura 9. Bússola utilizada antigamente na navegação (ISTHMUS E-COMMERCE, 2012).</i>	41
<i>Figura 10. Fluxo magnético (CEFET-PE, 2012)</i>	43
<i>Figura 11. Superfície gaussiana envolvendo uma carga (PORTAL FÍSICA, 2012)</i>	45
<i>Figura 12. Superfície contendo fluxo magnético (FÍSICA B, 2003)</i>	47
<i>Figura 13. Linhas do campo magnético da Terra (ALEODIN, 2012).</i>	47
<i>Figura 14. Corrente induzida criada pelo campo magnético do ímã (DA SILVA, 2012).</i>	49
<i>Figura 15. Sentido das correntes de indução</i>	50
<i>Figura 16. Campo magnético provocado por uma corrente (WIKIMEDIA, 2009).</i>	51
<i>Figura 17. Superfície com geometria contendo pontas (UNESP, 2012)</i>	53
<i>Figura 18. Processo de ionização (MIRANDA, 1994)</i>	54
<i>Figura 19. Efeito Corona em uma cadeia de isoladores (MELLO, 2007).</i>	55
<i>Figura 20. Efeito Corona visualizado através da câmara DayCor® (DAYCOR®, 2008).</i>	55
<i>Figura 21. Efeito Corona em uma mufla visualizado através da câmara DayCor® (DAYCOR®, 2008).</i>	56
<i>Figura 22. Ensaio de hidrofobicidade em isolador polimérico (THOMAZINI, 2009).</i>	57
<i>Figura 23. Comparativo entre isoladores da classe de tensão de 138 kV (MANARA, 2012).</i>	58
<i>Figura 24. Isolador com sinais de corrosão (MELLO, CARDOSO e GONÇALVES, 2010).</i>	58
<i>Figura 25. Isolador com erosão na ferragem ocasionada pelo Efeito Corona (EKLUND INFRARED INC, 2009).</i>	59
<i>Figura 26. Isolador com erosão no núcleo ocasionado pelo Efeito Corona (EKLUND INFRARED INC, 2009).</i>	59
<i>Figura 27. Isolador com erosão no tarugo de fibra de vidro (EKLUND INFRARED INC, 2009).</i>	59
<i>Figura 28. Isolador contendo anel anti-corona (SCHUMANN, BARCIKOWSKI, et al., 2009).</i>	60
<i>Figura 29. Rede com a estrutura smart grid (AIRES, 2009).</i>	62

Figura 30. Mapa contendo os projetos, testes ou pilotos de smart grid no mundo (ALCÂNTARA, 2009)	65
Figura 31. Gráfico de perdas totais na distribuição de energia elétrica (ALCÂNTARA, 2010).....	68
Figura 32. Estrutura de uma rede inteligente (ALCÂNTARA, 2010)	69
Figura 33. Fibra óptica e sua composição (JUNIO, 2012)	78
Figura 34. Refração da luz dentro da fibra óptica (TOFFONI, 2009)	79
Figura 35. Rede de computadores.	80
Figura 36 – Modem PLC (KARASINSKI, 2010).....	82
Figura 37– Rede inteligente utilizando ZigBee (LIN, 2009).....	84
Figura 38. Gráfico comparando a taxa de transmissão das tecnologias ZigBee, Bluetooth e Wi-Fi (PINHEIRO, 2010)	89
Figura 39 – Receptor para monitoramento via GPRS (CAU30 ELETRÔNICOS, 2010)...	90
Figura 40 – Monitoramento via GPRS de uma geração eólica (SMART GRID – DIRECT COMMUNICATION FOR ENERGY NETWORKS, 2010)	92
Figura 41. Malha de elementos finitos de uma superfície qualquer (SOUZA, 2003).....	96
Figura 42. Aproximação de uma função qualquer com 5 e 9 elementos (GIANCCHINI, 2012).....	97
Figura 43. Exemplo de malha estruturada (AVILA, 2010).....	99
Figura 44. Exemplo de malha não estruturada (AVILA, 2010).....	99
Figura 45. Malha de elementos finitos para uma superfície Ω (RIBEIRO, 2007)	100
Figura 46. Elemento finito número 1 (RIBEIRO, 2007).....	101
Figura 47. Matriz elementar do elemento finito 1.....	103
Figura 48. Matriz elementar do elemento finito 2.....	103
Figura 49. Matriz elementar do elemento finito 3.....	104
Figura 50. Matriz elementar do elemento finito 4.....	104
Figura 51. Matriz elementar do elemento finito 5.....	104
Figura 52. Matriz elementar do elemento finito 6.....	105
Figura 53. Matriz elementar do elemento finito 7.....	105
Figura 54. Matriz elementar do elemento finito 8.....	105
Figura 55. Matriz elementar do elemento finito 9.....	106
Figura 56. Matriz elementar do elemento finito 10.....	106
Figura 57. Matriz elementar do elemento finito 11.....	106
Figura 58. Matriz elementar do elemento finito 12.....	107
Figura 59. Estrutura da matriz global.....	107
Figura 60. Matriz global de ordem 11x11	108
Figura 61. Elemento finito na forma triangular.....	110
Figura 62. Dimensões do resistor.....	113
Figura 63. Resistor dividido em elementos finitos.....	114

<i>Figura 64. Linha de corte do campo elétrico.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 65. Propriedades físicas do isolador.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 66. Dimensões do anel anti-corona estudadas.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 67. Intensidade do campo elétrico no isolador polimérico da classe de tensão 500 kV, sem anel anti-corona.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 68. Intensidade do campo elétrico no isolador polimérico da classe de tensão 500 kV, com anel anti-corona.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 69. Indicação do 1º e do 2º picos de intensidade do campo elétrico.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 70. Interseção do 1º e 2º pico do campo elétrico.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 71. Diâmetro das aletas do isolador</i>	<i>128</i>
<i>Figura 72. Fluxograma do programa desenvolvido em PHP.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 73. Comando para geração de malhas.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 74. Arquivo gerado pela formação de malha (AREND, 2009).....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 75. Estrutura para solução de problemas utilizando o programa GetDP (DULAR e GEUZAINÉ, 2009).....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 76. Circuito de ensaio.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 77. Sensor RFBee (SEED WIKI, 2012)</i>	<i>139</i>
<i>Figura 78. Plataforma Arduino (ARDUINO, 2012)</i>	<i>140</i>
<i>Figura 79. Analisador de Espectro RF Explorer (RF EXPLORER, 2012).....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 80. Antena direcional modelo PQAC-8020 (PROELETRONIC, 2012)</i>	<i>144</i>
<i>Figura 81. Diagrama de irradiação da antena PQAC-9017 (PROELETRONIC, 2008)...</i>	<i>145</i>
<i>Figura 82. antena utilizada no experimento (PROELETRONIC, 2008).....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 83. Antena omnidirecional utilizada no experimento.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 84. Sequência de dados enviadas pelo programa Docklight</i>	<i>147</i>
<i>Figura 85. Isolador no experimento, sem anel anti-corona</i>	<i>149</i>
<i>Figura 86. Isolador no experimento, com anel anti-corona de diâmetro do condutor de 1,5 cm.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 87. Isolador no experimento, com anel anti-corona de diâmetro do condutor de 7,0 cm.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 88. Posicionamento do experimento</i>	<i>150</i>
<i>Figura 89. Posicionamento do experimento</i>	<i>151</i>
<i>Figura 90. Desenho do isolador no Gmsh</i>	<i>153</i>
<i>Figura 91. Detalhe do terminal bola do isolador</i>	<i>153</i>
<i>Figura 92. Detalhe do terminal concha do isolador.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 93. Detalhe das aletas do isolador</i>	<i>154</i>
<i>Figura 94. Objeto de estudo com o limite de superfície</i>	<i>154</i>
<i>Figura 95. Terminal bola, fabricado em aço</i>	<i>155</i>
<i>Figura 96. Terminal concha, fabricado em aço.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 97. Aletas do isolador, fabricadas em silicone</i>	<i>155</i>

<i>Figura 98. Anel anti-corona, fabricado em alumínio.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 99. Tarugo pultrudado, fabricado em fibra de vidro</i>	<i>156</i>
<i>Figura 100. Definições das propriedades físicas no solver.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 101. Componentes com aplicação de potencial fase.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 102. Componente com aplicação de potencial terra</i>	<i>156</i>
<i>Figura 103. Malha da área sob estudo</i>	<i>157</i>
<i>Figura 104. Malha sem refino.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 105. Malha refinada.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 106. Carta de campo do potencial elétrico</i>	<i>158</i>
<i>Figura 107. Carta de campo das linhas equipotenciais</i>	<i>159</i>
<i>Figura 108. Carta de campo do campo elétrico</i>	<i>159</i>
<i>Figura 109. Carta de campo da densidade elétrica</i>	<i>160</i>
<i>Figura 110. Gráfico do potencial elétrico na linha de corte</i>	<i>160</i>
<i>Figura 111. Campo elétrico na linha de corte</i>	<i>161</i>
<i>Figura 112. Intensidade do campo elétrico para “r” = 7,5 cm.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 113. Campo elétrico mediante as variações do diâmetro do condutor do anel anti-corona (“d”)</i>	<i>164</i>
<i>Figura 114. Dados de entrada (“medidos”) x funções estudadas.....</i>	<i>172</i>
<i>Figura 115. Gráfico comparando os dados de entrada com a função Polinomial de ordem 5.....</i>	<i>187</i>
<i>Figura 116. Gráfico comparando os dados de entrada com a função Polinomial de ordem 4 (equações 17 e 24)</i>	<i>187</i>
<i>Figura 117. Fonte de tensão de 350 kV.....</i>	<i>188</i>
<i>Figura 118. Sensor RFBee – Nó 1</i>	<i>189</i>
<i>Figura 119. Sensor RFBee – Nó 2</i>	<i>189</i>
<i>Figura 120. Sensor RFBee na plataforma Arduíno.....</i>	<i>189</i>
<i>Figura 121. Sistema transmissor (antena e sensor)</i>	<i>190</i>
<i>Figura 122. Sistema receptor</i>	<i>190</i>
<i>Figura 123. Intensidade do campo elétrico no isolador polimérico da classe de tensão 500 kV, sem anel anti-corona.....</i>	<i>191</i>
<i>Figura 124. Isolador sem anel anti-corona</i>	<i>192</i>
<i>Figura 125. Isolador com anel “pequeno”</i>	<i>193</i>
<i>Figura 126. Isolador com anel “grande”.....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 127. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 1).....</i>	<i>194</i>
<i>Figura 128. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 2).....</i>	<i>194</i>
<i>Figura 129. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 3).....</i>	<i>195</i>
<i>Figura 130. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem anel anti-corona (parte 1)..</i>	<i>195</i>
<i>Figura 131. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem anel anti-corona (parte 2)..</i>	<i>195</i>
<i>Figura 132. Sinal da transmissão utilizando isolador sem anel anti-corona (parte 3).....</i>	<i>196</i>

<i>Figura 133. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel “pequeno” (parte 1)</i>	<i>196</i>
<i>Figura 134. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel “pequeno” (parte 2)</i>	<i>196</i>
<i>Figura 135. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel “pequeno” (parte 3)</i>	<i>197</i>
<i>Figura 136. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel “grande” (parte 1)</i>	<i>197</i>
<i>Figura 137. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel “grande” (parte 2)</i>	<i>197</i>
<i>Figura 138. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel “grande” (parte 3)</i>	<i>198</i>
<i>Figura 139. Esquema de comunicação de dados entre os sensores.....</i>	<i>198</i>
<i>Figura 140. Dados do experimento – isolador sem tensão.....</i>	<i>199</i>
<i>Figura 141. Dados do experimento – isolador sem anel.....</i>	<i>199</i>
<i>Figura 142. Dados do experimento – isolador com anel pequeno</i>	<i>200</i>
<i>Figura 143. Dados do experimento – isolador com anel grande.....</i>	<i>200</i>
<i>Figura 144. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 1).....</i>	<i>202</i>
<i>Figura 145. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 2).....</i>	<i>202</i>
<i>Figura 146. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 3).....</i>	<i>202</i>
<i>Figura 147. Sinal da transmissão utilizando isolador sem anel anti-corona (parte 1).....</i>	<i>203</i>
<i>Figura 148. Sinal da transmissão utilizando isolador sem anel anti-corona (parte 2).....</i>	<i>203</i>
<i>Figura 149. Sinal da transmissão utilizando isolador sem anel anti-corona (parte 3).....</i>	<i>203</i>
<i>Figura 150. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel “pequeno” (parte 1)</i>	<i>204</i>
<i>Figura 151. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel “pequeno” (parte 2)</i>	<i>204</i>
<i>Figura 152. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel “pequeno” (parte 3)</i>	<i>204</i>
<i>Figura 153. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel “grande” (parte 1)</i>	<i>205</i>
<i>Figura 154. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel “grande” (parte 2)</i>	<i>205</i>
<i>Figura 155. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel “grande” (parte 3)</i>	<i>205</i>
<i>Figura 156. Dados do experimento isolador sem tensão.....</i>	<i>206</i>
<i>Figura 157. Dados do experimento isolador sem anel.....</i>	<i>206</i>
<i>Figura 158. Dados do experimento isolador com anel “pequeno”</i>	<i>207</i>
<i>Figura 159. Dados do experimento isolador com anel “grande”.....</i>	<i>207</i>
<i>Figura 160. Sinal recebido utilizando antenas direcionais</i>	<i>208</i>
<i>Figura 161. Sinal recebido utilizando antenas omnidirecionais.....</i>	<i>209</i>
<i>Figura 162. Configuração do sistema.....</i>	<i>210</i>
<i>Figura 163. Dados do experimento isolador com anel grande.....</i>	<i>210</i>
<i>Figura 164. Exemplo de sinal modulado BPSK (ISEL, 2010)</i>	<i>240</i>
<i>Figura 165. Modulação O-QPSK (MACHADO, 2010).....</i>	<i>241</i>
<i>Figura 166. Constelação QPSK e O-QPSK (MACHADO, 2010).....</i>	<i>242</i>
<i>Figura 167. Diagrama de constelação da modulação O-QPSK e QPSK (BAPTISTA, 2008)</i> <i>.....</i>	<i>242</i>
<i>Figura 168. Topologia de rede malha.....</i>	<i>243</i>
<i>Figura 169. Topologia de rede estrela.....</i>	<i>244</i>

<i>Figura 170. Topologia de rede árvore.....</i>	<i>245</i>
<i>Figura 171. Camadas do protocolo ZigBee (PINHEIRO, 2010).....</i>	<i>246</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tecnologias de transmissão sem fio.....	85
Tabela 2. Tabela contendo a posição da matriz elementar.....	102
Tabela 3. Numeração para montagem da matriz do elemento1	114
Tabela 4. Valores do campo elétrico (kV/m) para “d” (diâmetro do condutor do anel anti-corona) igual a 1cm.....	161
Tabela 5. Valores do campo elétrico (kV/m) da diferença do 1º e 2º pico.....	162
Tabela 6. Dados obtidos na simulação.....	163
Tabela 7. Dados de identificação e dados de validação	164
Tabela 8. Funções e expressões analisadas.....	165
Tabela 9. Dados estimados com a função Linear.....	165
Tabela 10. Dados estimados de validação para a função Linear.....	166
Tabela 11. Dados estimados com a função Exponencial	166
Tabela 12. Dados estimados de validação para a função Exponencial	166
Tabela 13. Dados estimados com a função Logarítmica	167
Tabela 14. Dados estimados de validação para a função Logarítmica	167
Tabela 15. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 2.....	167
Tabela 16. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 2	168
Tabela 17. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 3.....	168
Tabela 18. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 3	168
Tabela 19. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 4.....	169
Tabela 20. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 4	169
Tabela 21. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 5.....	169
Tabela 22. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 5	170
Tabela 23. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 6.....	170
Tabela 24. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 6	170
Tabela 25. Dados estimados com a função Potência	171
Tabela 26. Dados estimados de validação para a função Potência.....	171
Tabela 27. Tabela classificando as funções através do valor mínimo do RMQ	172
Tabela 28. Tabela classificando as funções através do valor mínimo do erro percentual	173
Tabela 29. Dados para a identificação do modelo - Sequência 1	174
Tabela 30. Dados para a identificação do modelo - Sequência 2	174
Tabela 31. Dados para validação do modelo - Sequência 1.....	174
Tabela 32. Dados para validação do modelo - Sequência 2.....	174
Tabela 33. Modelos identificados para a sequência 1	175

Tabela 34. Dados estimados com a função Linear da sequência 1	175
Tabela 35. Dados estimados de validação para a função Linear da sequência 1	175
Tabela 36. Dados estimados com a função Exponencial da sequência 1.....	176
Tabela 37. Dados estimados de validação para a função Exponencial da sequência 1	176
Tabela 38. Dados estimados com a função Logarítmica da sequência 1	176
Tabela 39. Dados estimados de validação para a função Logarítmica da sequência 1 .	176
Tabela 40. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 2 da sequência 1.....	177
Tabela 41. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 2 da sequência 1.....	177
Tabela 42. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 3 da sequência 1.....	177
Tabela 43. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 3 da sequência 1.....	177
Tabela 44. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 4 da sequência 1.....	178
Tabela 45. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 4 da sequência 1.....	178
Tabela 46. Dados estimados com a função Potência da sequência 1	178
Tabela 47. Dados estimados de validação para a função Potência da sequência 1	178
Tabela 48. Tabela classificando as funções da sequência 1 através do valor mínimo do RMQ	179
Tabela 49. Tabela classificando as funções da sequência 1 através do valor mínimo do erro percentual.....	179
Tabela 50. Modelos identificados para a sequência 2	180
Tabela 51. Dados estimados com a função Linear da sequência 2	180
Tabela 52. Dados estimados de validação para a função Linear da sequência 2.....	180
Tabela 53. Dados estimados com a função Exponencial da sequência 2.....	181
Tabela 54. Dados estimados de validação para a função Exponencial da sequência 2	181
Tabela 55. Dados estimados com a função Logarítmica da sequência 2	181
Tabela 56. Dados estimados de validação para a função Logarítmica da sequência 2 .	181
Tabela 57. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 2 da sequência 2.....	182
Tabela 58. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 2 da sequência 2.....	182
Tabela 59. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 3 da sequência 2.....	182
Tabela 60. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 3 da sequência 2.....	182
Tabela 61. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 4 da sequência 2.....	183
Tabela 62. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 4 da sequência 2.....	183
Tabela 63. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 5 da sequência 2.....	183
Tabela 64. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 5 da sequência 2.....	183

<i>Tabela 65. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 6 da sequência 2.....</i>	<i>184</i>
<i>Tabela 66. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 6 da sequência 2.....</i>	<i>184</i>
<i>Tabela 67. Dados estimados com a função Potência da sequência 2.....</i>	<i>184</i>
<i>Tabela 68. Dados estimados de validação para a função Potência da sequência 2.....</i>	<i>184</i>
<i>Tabela 69. Tabela classificando as funções da sequência 2 através do valor mínimo do RMQ.....</i>	<i>185</i>
<i>Tabela 70. Tabela classificando as funções da sequência 2 através do valor mínimo do erro percentual.....</i>	<i>185</i>
<i>Tabela 71. Tabela classificando as funções da sequência 2 através do valor mínimo da média.....</i>	<i>186</i>
<i>Tabela 72. Número de pacotes na comunicação de dados.....</i>	<i>201</i>
<i>Tabela 73. Número de pacotes na comunicação de dados.....</i>	<i>207</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	= duas dimensões
ABRADEE	= Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica
AMI	= “Advanced Meter Infrastructure”
AMR	= “Advanced Meter Reading”
ANEEL	= Agência Nacional de Energia Elétrica
APS	= Suporte à Aplicação
APTEL	= Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações
ARPA	= Agência de Desenvolvimento de Projetos Avançados
BPL	= “Broadband Power Line”
BPSK	= “Binary Phase Shift Keying”
CELPE	= Companhia Energética de Pernambuco
CEMIG	= Companhia Energética de Minas Gerais
CGEE	= Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CGI	= “Common Gateway Interface”
CHESF	= Companhia Hidroelétrica do São Francisco
Cigré	= Comitê Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
COPEL	= Companhia Paranaense de Energia Elétrica
CPFL	= Companhia Paulista de Força e Luz
CPqD	= Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
DEC	= Duração de Interrupção Equivalente em horas
DIC	= Duração de Interrupção por Unidade Consumidora
DMIC	= Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora
DSL	= “Digital Subscriber Loop”
DSS	= Técnica de Transmissão de Sequência Direta
EAP	= Extra Alta Poluição
EPE	= Empresa de Pesquisa Energética
FEC	= Frequência Equivalente de Interrupção
FFD	= “Full Function Device”
FIC	= Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora
GE	= “General Electric”
GIS	= “Geographic Information System”
GIUNC	= “Global Intelligent Utility Network Coalition”

GPRS	= "General Packet Radio Service"
GRUCAD	= Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
HAN	= "Human Area Network"
HTML	= "HyperText Markup Language"
IEEE	= "Institute of Electrical and Eletronics Engineers"
IP	= "Internet Protocol"
ISM	= "Industrial Medical Scientific"
LAN	= "Local Area Network"
LT	= Linhas de Transmissão
MAC	= "Medium Access Control"
MAN	= "Metropolitan Area Network"
MEF	= Método dos Elementos Finitos
MME	= Ministério de Minas e Energia
MMQ	= Método dos Mínimos Quadrados
NASA	= "National Aeronautics and Space Administration"
NWK	= "Network"
ONS	= Operador Nacional do Sistema Elétrico
O-QPSK	= "Offset Quadrature Phase Shift Keying"
P&D	= Pesquisa e Desenvolvimento
PDA's	= "Personal Digital Assistant"
PER	= "Packet Error Rate"
PHP	= "Hypertext Preprocessor"
PLC	= "Power Line Commuication"
PSK	= "Phase Shift Keying"
RF	= Rádio Frequência
RFD	= "Reduced Function Device"
RIV	= Rádio Interferência
RMQ	= Resíduo Médio Quadrático
RSSF	= Redes de Sensores Sem Fio
RSSI	= "Received Signal Strength Indication"
S.I.	= Sistema Internacional
SCADA	= "Supervisory, Controland Data Acquisition System"
SO	= Sistemas Operacionais
TCP	= "Transmission Control Protocol"

TI	=	Tecnologia de Informação
TIC's	=	Tecnologias da Informação e Comunicação
TMA	=	Tempo Médio de Atendimento
UDP	=	“User Datagram Protocol”
UTC	=	“Utilities Telecom Council”
V.S.W.R.	=	“Voltage Standing Wave Ratio”
WAN	=	“Wide Area Network”
Wi-Fi	=	“Wireless Fidelity”
Wi-Max	=	“Worldwide Interoperability for Microwave Access”

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	26
1.1. Contextualização do Problema	26
1.2. Justificativa Para o Desenvolvimento do Trabalho	31
1.3. Objetivo do Trabalho.....	32
1.4. Resultados Esperados	32
1.5. Delimitação da Pesquisa.....	32
1.6. Organização da Dissertação.....	33
2. CAMPO ELÉTRICO EM ISOLADORES DE ALTA TENSÃO.....	35
2.1. Campo elétrico	35
2.2. Densidade de fluxo elétrico.....	37
2.3. Campo magnético.....	39
2.4. Densidade de fluxo magnético.....	42
2.5. Equações de Maxwell	44
2.5.1. Lei de Gauss da Eletricidade.....	44
2.5.2. Lei de Gauss do Magnetismo.....	46
2.5.3. Lei da Indução (de Faraday-Lenz).....	48
2.5.4. Lei de Ampère	51
2.6. Efeito Corona	52
2.7. Isoladores de Alta Tensão	56
3. SMART GRID.....	61
3.1. História do conceito <i>smart grid</i> em redes elétricas.....	62
3.2. <i>Smart grid</i> no mundo.....	64
3.3. <i>Smart grid</i> no Brasil.....	66
3.4. A visão das concessionárias de energia elétrica	69
3.5. Algumas empresas que estão trabalhando com soluções para redes inteligentes no Brasil	74
3.6. Telecomunicações em redes inteligentes	77
3.6.1. Fibra óptica.....	78
3.6.2. Internet	80
3.6.3. PLC	81
3.6.4. ZigBee	83
3.6.5. <i>Bluetooth</i>	87
3.6.6. <i>Wi-Fi</i>	88
3.6.7. <i>Wi-Max</i>	89
3.6.8. GPRS	90
4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADOS À SIMULAÇÃO.....	93

4.1.	Método dos Elementos Finitos	93
4.2.	Etapas para solução de problemas utilizando o MEF	98
4.2.1.	Geração de malhas	98
4.2.2.	Forma “Forte”	100
4.2.3.	Forma “Fraca”	100
4.3.	Exemplo de solução utilizando o MEF	100
4.4.	Vantagens e desvantagens.....	109
4.5.	MEF aplicado à eletrostática	110
4.5.1.	Exemplo de aplicação	113
4.6.	Programas utilizando MEF	116
5.	METODOLOGIA	118
5.1.	Simulação	119
5.1.1.	Exemplo de solução utilizando o MEF.....	119
5.1.2.	<i>Softwares</i> utilizados.....	124
5.1.3.	Desenvolvimento da simulação	127
5.2.	Modelagem Matemática.....	134
5.3.	Ensaio Laboratoriais.....	138
5.3.1.	Transmissor/receptor RF.....	139
5.3.2.	Analizador de espectros	141
5.3.3.	Antenas	141
5.3.4.	<i>Software</i> Docklight.....	146
5.3.5.	<i>Software</i> Python	147
5.3.6.	Transmissão de dados estudando a variação da portadora.....	148
5.3.7.	Transmissão de dados estudando a RSSI e pacotes perdidos	151
6.	RESULTADOS.....	153
6.1.	Resultados da Simulação	153
6.2.	Resultados da modelagem matemática	164
6.2.1.	Análise refinada.....	173
6.2.2.	Gráfico das funções.....	186
6.3.	Resultado do ensaio laboratorial.....	188
6.3.1.	Antenas Direcionais.....	190
6.3.2.	Antenas Ominidirecionais	201
6.3.3.	Comparativo da variação da portadora	208
6.3.4.	Análise alterando a posição dos sensores	209
7.	CONCLUSÃO	211
8.	REFEFÊNCIAS	214
9.	ANEXOS	240
9.1.	Anexo A – Modulação BPSK	240
9.2.	Anexo B – Modulação O-QPSK	241

9.3.	Anexo C – Topologias para redes ZigBee	243
9.4.	Anexo D – Camadas do protocolo ZigBee	246
9.5.	Anexo E – Ficha Técnica do Isolador IPB 500/CB/120/EAP/117	248
9.6.	Anexo F – Programação realizada em PHP para desenho da geometria do isolador	250
9.7.	Anexo G – Biblioteca para resolução de problemas eletrostáticos	258
9.8.	Anexo H – Programa em Python.....	259
9.9.	Anexo I – Programa realizado em PHP	261

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do Problema

Nos últimos anos, o Brasil vem apresentando um crescimento de sua economia, impulsionando o crescimento de vários setores como: comercial, residencial e industrial. Estes três setores contribuíram para o crescimento do consumo de energia elétrica brasileiro que, nos últimos 10 anos, apresentou um crescimento médio de 4,29%, fechando o ano de 2011 com 430.106 GWh consumidos (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009). Mais ainda, um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê, no Brasil, um crescimento médio de 4,5% no consumo de energia elétrica para a próxima década (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009).

Com o aumento do consumo de energia elétrica, surgiu a necessidade de criação de novas usinas geradoras de energia elétrica, tendo como destaque, nos últimos anos, as usinas hidrelétricas de Belo Monte, com capacidade instalada de 11.233 MW, Teles Pires, com capacidade instalada de 1.820 MW e a usina hidrelétrica de São Luiz do Tapajós, com capacidade instalada da ordem de 7.000 MW (JARDINI, ETT, *et al.*, 2011).

O Plano Decenal da EPE prevê um crescimento no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) de 110 GW (dados de dezembro de 2010) para 171 GW (previsão para dezembro de 2020), com priorização das fontes renováveis (hidráulica, eólica e biomassa) (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009).

As usinas geradoras de energia elétrica, normalmente, encontram-se distantes do mercado consumidor, sendo interligadas através de Linhas de Transmissão (LT's). O crescimento das LT's para a década de 2010 a 2019 está previsto para 42%, fazendo com que a extensão de, aproximadamente, 110.000 km (dados de 2010) aumente para aproximadamente 171.000 km. Dentre este

crescimento, pode-se citar vários projetos em execução e outros em fase de estudos como, por exemplo, a Interligação das Usinas do Rio Madeira, Belo Monte, Teles Pires, Tapajós, Boa Vista (Manaus) e Interligação Brasil-Peru (JARDINI, ETT, *et al.*, 2011).

Nestas LT's, a classe de tensão que possui maior tendência de crescimento é a classe de 500 kV, seguida pela classe de 600 kV, tendo um crescimento previsto de 21.650 km e 14.024 km respectivamente (JARDINI, ETT, *et al.*, 2011).

A utilização de extra alta tensão nas LT's, que compreende nas classes de tensão de 230 kV a 800 kV, deve-se ao fato dos condutores não serem ideais e apresentarem resistência elétrica. Com isto, existe uma dissipação de potência nesses condutores, decorrente da passagem da corrente elétrica pelos mesmos. Este efeito é conhecido como Efeito Joule e a potência dissipada nesses condutores é diretamente proporcional à corrente que circula pelos mesmos. Com isto, quanto menor a corrente que circula pelos condutores menor será a potência dissipada, sendo que a diminuição da corrente pode ser obtida, elevando-se a tensão de transmissão. Diminuindo a corrente que circula pelos condutores, também é possível economizar na bitola do cabo o que, a princípio, reduz diretamente o custo do projeto, além de solicitar menor esforço de sustentação das estruturas, fazendo com que elas tenham um custo reduzido. Em suma, a elevação da tensão de transmissão implica na diminuição da corrente e, conseqüentemente, em cabos com bitolas menores, reduzindo, assim, os gastos com condutores e apresentando menos perdas por Efeito Joule.

A diminuição da corrente pelo uso de alta tensão na transmissão também traz como vantagem uma menor queda de tensão nos condutores (uma vez que essa queda é diretamente proporcional à corrente que circula nos mesmos), de acordo com a primeira Lei de Ohm (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE, 2012) e menor vibração. Entretanto, a transmissão em extra alta tensão não apresenta somente vantagem; tem-se também desvantagens como a questão da isolamento. Em circuitos elétricos de corrente alternada, quanto maior a tensão, maior a possibilidade da existência de um curto entre fases, pois os condutores

encontram-se muito próximos do limiar da rigidez dielétrica do ar. Assim, existe a necessidade de utilização de equipamentos que a isolação entre fases, e entre fase e terra.

Outro ponto que pode-se citar como desvantagem é o aumento do Efeito Corona, que além de gerar ruídos eletromagnéticos, aumenta o nível do campo elétrico em volta dos condutores e do isolador. Estudos comprovam que quanto maior o potencial elétrico em uma LT, maior é o Efeito Corona gerado (LEÃO, 2008).

O isolador é um equipamento muito utilizado nas LT's e possui em seu projeto, características mecânicas e elétricas. Como característica mecânica, pode-se citar a necessidade do isolador suportar esforços mecânicos entre seus terminais, decorrentes do peso dos condutores e da ação do vento sobre os condutores.

Como características elétricas pode-se citar suas distâncias de arco e de escoamento. A distância de arco é essencial para evitar que o isolador apresente falha (*flashover*), através de descargas disruptivas provenientes de descargas atmosféricas (raios) ou acionamento de chaves seccionadoras. Já a distância de escoamento possui como objetivo aumentar o caminho entre fase e terra, fazendo com que os elétrons da corrente elétrica tenham um caminho maior a percorrer entre estes dois pontos. Esta distância de escoamento é muito importante quando existem fatores climáticos envolvidos, como por exemplo, tempo úmido, chuva e tipo do nível de poluição. Estes fatores reduzem a distância de escoamento por possuírem características condutoras reduzindo a isolação das mesmas.

Nos isoladores, o Efeito Corona também está presente, principalmente no seu terminal fase. Este efeito tem o formato de uma coroa luminosa, principalmente em pontos com mudança brusca no formato de sua superfície. O Efeito Corona é responsável pela perda de energia elétrica de centenas de kW/km nas LT's e gerar ruídos que chegam a 65dBm. Este efeito ocorre quando o valor

crítico do ar¹ é ultrapassado (MELLO, 2007), fazendo com que os elétrons colidam com o ar, ocasionando a formação de ozônio, que é uma das principais causas de degradação em isoladores, seja em suas ferragens ou em seu núcleo de fibra de vidro, quando o mesmo é utilizado em isoladores poliméricos.

Os isoladores poliméricos estão sendo cada vez mais utilizados devido à sua característica de hidrofobicidade (que representa a capacidade do material em repelir água) ser muito superior aos materiais de vidro e porcelana, que também são utilizados na fabricação de isoladores, além de reduzir o número de isoladores danificados por vandalismo. Com a utilização de isoladores poliméricos nas LT's, é possível reduzir os custos de projeto, sendo possível utilizar torres mais compactas, devido à redução do peso dos mesmos em relação a isoladores de vidro e/ou porcelana. É possível utilizar torres de uma LT de 500 kV, projetadas para isoladores fabricados em vidro e/ou porcelana, para o projeto de um sistema da classe de tensão de 800 kV, utilizando isoladores poliméricos (TAVARES, MENEZES, *et al.*, 2009).

Para mitigar o Efeito Corona em isoladores, utiliza-se um dispositivo chamado anel anti-corona. Este dispositivo possui o intuito de equalizar o campo eletromagnético e pode ser construído utilizando qualquer material condutor, como por exemplo, ferro ou alumínio e pode apresentar vários formatos e dimensões. O formato mais usual é o de um cilindro. A equalização do campo elétrico no isolador também possui o intuito de não formação de rádio interferência (RIV), efeito este que pode interferir em canais de comunicações. O valor máximo da RIV é especificado pela norma NBR 15121 (ABNT, 2004).

Com o aumento da extensão das LT's, as mesmas estão cada vez mais sendo construídas dentro das cidades, na qual o campo elétrico provenientes desta linha podem ultrapassar a intensidade estabelecida pela ANEEL (ANEEL, 2010), além de uma possível interferência em sinais de comunicação, que

¹ O valor crítico do ar representa o momento em que o ar passa a obter a propriedade condutora elétrica ao invés das propriedades de isolamento.

poderão ser decorrentes de frequências livres (915 MHz; 2,4 GHz; 5,8 GHz) ou de sistema de telefonia móvel que está em pleno desenvolvimento.

Estas frequências também podem ser utilizadas em sistemas supervisórios na tecnologia *smart grid*, que apresenta inúmeras vantagens oferecendo condições de monitorar e controlar toda a rede, tais como localizar pontos de perda de energia elétrica por defeitos em dispositivos, rastrear furtos por conta de ligações clandestinas na rede, desligar ligações de clientes por falta de pagamento. Mas a principal vantagem dessa arquitetura é que ela apresenta condições de um consumidor que possui fontes de energia renovável em sua residência, que irá consumir a energia gerada das fontes e o que faltar para suprir sua demanda de consumo utiliza da rede, mas a partir do momento que não estiver consumindo toda a energia gerada de suas fontes a energia é enviada para a rede para alimentar algum consumidor que também esteja ligado no mesmo circuito.

A Resolução 432 da ANEEL regulamenta os requisitos básicos para os sistemas de medição eletrônica de energia elétrica (medidores eletrônicos) para consumidores residenciais, rurais e demais classes, exceto baixa renda e iluminação pública, sendo assim um ponto de partida para o conceito de *smart grid* no Brasil (ANEEL, 2011) (ANEEL, 2012).

O investimento em tecnologias de *smart grid* é um jogo de valor em longo prazo, e será de importância vital educar os consumidores sobre os benefícios estratégicos destes investimentos, pois ele será o grande beneficiário. As concessionárias irão oferecer novas opções de tarifas, novos serviços, possibilitando ao usuário final redução com gastos de energia, na qual será possível ter um controle melhor do seu consumo de energia elétrica (NEI, 2011).

As concessionárias estão investindo um valor alto na automatização das suas redes de concessão, para fazer a parte de comunicação de toda a estrutura física da rede com toda a parte de sistema utilizado pela concessionária, entre os recursos de telecomunicações, que envolve o meio com que as informações de campo chegam às concessionárias e como é feita a intervenção da mesma no campo (SENDI, 2012).

A supervisão utilizando o *smart grid* poderá ser realizada por diversos sensores e/ou equipamentos, utilizando os mais diversos tipos de tecnologia para se comunicar, como por exemplo: *Power Line Commuication* (PLC), *ZigBee*, *Bluetooth*, *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (Wi-Max), *General Packet Radio Service* (GPRS), fibra óptica ou equipamentos utilizando faixas de frequência livre (915 MHz, 2.4 GHz e 5.8 GHz).

1.2. Justificativa Para o Desenvolvimento do Trabalho

Segundo um estudo do CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos), no Brasil, aproximadamente 15% da energia gerada é perdida entre a geração e o consumidor final. Este número pode diminuir, realizando uma supervisão em todas as fases deste processo (geração, transmissão e distribuição) (COSTA, 2012). Esta supervisão pode ser aplicada em diversos equipamentos, para assim, monitorar e supervisionar a rede, dando-lhe maior eficiência. Esta eficiência está sendo buscada no conceito de *smart grid* em todo o mundo e iniciando, aos poucos, aqui no Brasil.

As LT's apresentam vários níveis de tensão, entretanto, conforme citado anteriormente, a classe de tensão com maior previsão de crescimento é a de 500 kV. Por serem linhas que estão em fase de projeto e execução, existe uma grande possibilidade delas incorporarem o conceito de *smart grid* e já saírem do projeto com suporte para seu monitoramento.

Os isoladores poliméricos apresentam um projeto mais compacto e leve, quando comparado aos isoladores de vidro e/ou porcelana. Esses isoladores poliméricos apresentam um crescimento de utilização em linhas novas, bem como na substituição dos isoladores de vidro e/ou porcelana seja ela em virtude de vandalismo, grau de poluição ou a necessidade de isoladores mais leves e compactos. Portanto, este trabalho será realizado utilizando este tipo de tecnologia.

1.3. Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é verificar a distribuição do campo elétrico em um isolador polimérico da classe de tensão de 500 kV, mediante a variação dimensional do anel anti-corona de tubo circular. Espera-se verificar a influência do raio (distância do centro do tubo do anel anti-corona até o núcleo do isolador), a altura (distância do centro do tubo do anel anti-corona até o terminal fase) e o diâmetro do tubo circular do anel anti-corona sobre a intensidade do campo elétrico presente ao redor do terminal fase do isolador.

Mais ainda, este trabalho pretende verificar a interferência gerada por este campo elétrico em sinais de comunicação na faixa de frequência de 915 MHz.

1.4. Resultados Esperados

Na primeira parte do trabalho, espera-se, utilizando o MEF, através de softwares livre, verificar o comportamento das dimensões do anel anti-corona na intensidade do campo elétrico provenientes do terminal fase do isolador polimérico classe de tensão de 500 kV.

Na segunda parte do trabalho, com os valores ótimos da intensidade do campo elétrico, espera-se obter uma função matemática que represente este comportamento.

Na terceira parte do trabalho, espera-se, verificar se o campo elétrico presente no terminal fase do isolador polimérico causa interferência em sistemas de comunicações da faixa de frequência livre de 915 MHz.

1.5. Delimitação da Pesquisa

O estudo do comportamento do campo elétrico em isoladores poliméricos da classe de tensão de 500 kV, será realizado através de programas computacionais e não será considerada a estrutura da torre de transmissão, o tipo

de arranjo dos cabos da LT e nem uma possível diferença de potencial no terminal terra do isolador devido a sua impedância e altura da estrutura da torre de transmissão, este mesmo procedimento foi utilizado em (ELEPERUMA, SAHA e GILLESPIE, 2005) (İLHAN e ÖZDEMİR, 2008) (SCHÜMANN, BARCIKOWSKI, *et al.*, 2002).

O estudo da interferência do campo elétrico em sistemas de comunicação será realizado na tensão fase-terra da classe de tensão de 500 kV, utilizando um sistema de comunicação na faixa de frequência de 915 MHz.

1.6. Organização da Dissertação

No capítulo 2, é apresentado o conceito de campo elétrico, abordando as equações de Maxwell, descrevendo, também, o Efeito Corona e o aparecimento deste fenômeno em isoladores de alta tensão.

No capítulo 3, é apresentado o conceito de *smart grid*, relatando suas características, descrevendo um breve histórico da tecnologia e reportando as tecnologias que podem ser utilizadas neste conceito, dando ênfase à tecnologia Zigbee, utilizada neste trabalho.

No capítulo 4, é apresentado o Método dos Elementos Finitos (MEF) e seu campo de atuação. Este capítulo aborda, também, as etapas necessárias para a resolução de problemas utilizando este método. São demonstradas suas vantagens e desvantagens. Como este método será utilizado para simulação eletrostática, é apresentada, também, a utilização da eletrostática com MEF e programas computacionais com esta finalidade.

No capítulo 5, é apresentada a metodologia utilizada no trabalho, detalhando as etapas de simulação, determinação da função que representa a intensidade do campo elétrico e experimentos realizados em laboratórios, consistindo da transmissão de dados com a portadora centrada em 915 MHz, sendo analisados a variação da frequência central da portadora, RSSI (“*Received Signal Strength Indication*”) do sinal e o número de pacotes perdidos.

No capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos na simulação e a função que melhor representa a intensidade do campo elétrico na linha de corte pré-determinada. Também são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais, demonstrando a frequência central da portadora, o RSSI do sinal e o número de pacotes perdidos.

Finalmente, o capítulo 7 resume os resultados obtidos no capítulo 6 e apresenta a conclusão do trabalho.

2. CAMPO ELÉTRICO EM ISOLADORES DE ALTA TENSÃO

O campo elétrico está presente nos isoladores quando os mesmos estão submetidos a uma diferença de potencial. Este campo elétrico, dependendo de sua intensidade, pode causar danos ao sistema elétrico, bem como ao próprio isolador.

O campo elétrico dependendo de sua intensidade pode ocasionar o Efeito Corona responsável por perdas de energia elétrica, e gerar ozônio que é uma das principais causas de corrosão em isoladores.

O campo eletromagnético possui intensidade e direção, e é caracterizado pelas quatro funções vetoriais chamadas de equações de Maxwell (HALLIDAY, 2009). Para um melhor entendimento dos efeitos do campo eletromagnético em isoladores, serão apresentados os conceitos de campo elétrico (E), densidade de fluxo elétrico (D), campo magnético (H) e densidade de fluxo magnético (B) (VASCONCELOS, 2010).

2.1. Campo elétrico

O campo elétrico é um campo de força provocado pela ação de cargas elétricas. Os efeitos elétricos que ocorrem ao redor de uma carga elétrica só acontecem se existir um campo elétrico associado, que interage com a carga. Um exemplo deste fenômeno é a reação do cabelo de um ser humano com a tela de uma televisão convencional (de tubo de raios catódicos). As cargas elétricas da televisão interagem com o cabelo do ser humano e os deixam arrepiados. É importante lembrar que o campo elétrico só pode ser detectado quando o mesmo interage com uma carga de prova. Se não ocorrer esta interação, não existirá campo elétrico naquela região (HALLIDAY, 2009).

O campo elétrico é representado por um vetor, portanto possui direção, sentido e intensidade. A direção e o sentido do vetor, por convenção, são dados

pela direção e sentido da força que atua em uma carga de prova positiva colocada em um ponto, enquanto que a intensidade do vetor representa o módulo do campo elétrico em um dado ponto e é expressa pela equação (1) (HALLIDAY, 2009).

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{|q|} \quad (1)$$

Onde:

\vec{E} é o campo elétrico [N/C] ou [V/m];

\vec{F} é a força elétrica [N];

q é a carga de prova [C].

O vetor campo elétrico, por definição, possui a mesma direção do vetor da força de interação entre a carga geradora Q e a carga de prova q, apresentando o mesmo sentido quando $q < 0$ e sentido oposto quando $q > 0$ (HALLIDAY, 2009). Quando o campo elétrico é formado a partir de uma carga positiva, ele possui um sentido de afastamento, conforme Figura 1. Enquanto que o campo elétrico formado a partir de uma carga negativa, possui um sentido de aproximação, conforme Figura 2.

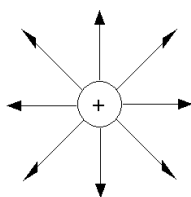


Figura 1. Campo elétrico formado por uma carga positiva (FILHO, 2008).

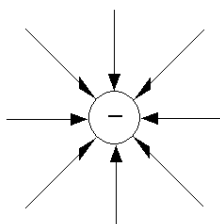


Figura 2. Campo elétrico formado por uma carga negativa (FILHO, 2008).

Portanto, o campo elétrico pode ser definido como o campo estabelecido em todos os pontos do espaço, onde existe uma carga geradora de intensidade Q exercendo uma força de interação em uma carga de prova q , seja ela de aproximação ou repulsão.

A Figura 3 apresenta uma carga Q e as linhas equipotenciais do campo elétrico.

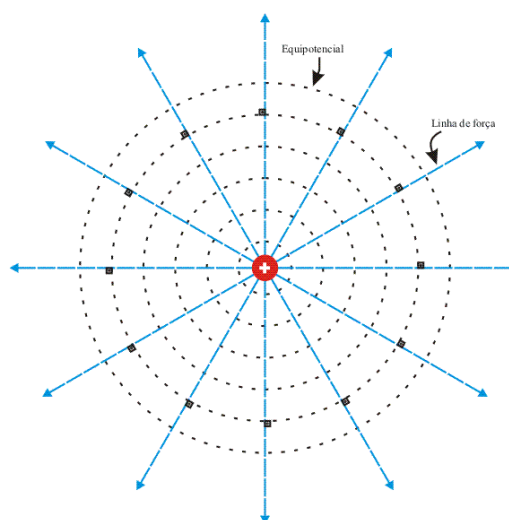


Figura 3. Linhas equipotenciais do campo elétrico formado por uma carga positiva (MENDES, 2012).

2.2. Densidade de fluxo elétrico

A densidade de fluxo elétrico pode ser expressa pela quantidade de linhas de força que atravessa uma determinada superfície. O fluxo elétrico foi observado pela primeira vez por Michael Faraday quando realizava experiências com esferas ocas. Faraday observou que, ao colocar uma esfera concêntrica dentro de outra esfera de raio maior, sendo a menor possuindo uma carga positiva Q , a esfera externa induzia uma carga negativa de intensidade igual à carga da esfera interna (FLEISCH, 2008). Durante seus experimentos, pôde comprovar que a carga induzida não dependia do tipo do material isolante colocado entre as duas esferas.

O fluxo elétrico pode ser expresso pela equação (2).

$$\Psi = Q \quad (2)$$

Onde:

Ψ é o fluxo elétrico [C];

Q é a carga na esfera interna [C].

Portanto, o fluxo elétrico é igual à carga elétrica.

Se o fluxo elétrico se iniciar em uma carga positiva no interior da esfera interna e terminar em uma carga negativa induzida na superfície interna da casca esférica externa, todas as linhas atravessam uma superfície imaginária de raio r no interior entre as duas esferas, conforme Figura 4.

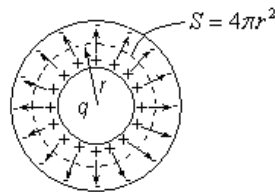


Figura 4. Densidade de fluxo entre as duas esferas (BELMIROW, 2012).

Como o fluxo elétrico está distribuído uniformemente entre as duas esferas, pode-se expressar a densidade do fluxo elétrico através da equação (3).

$$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \times \vec{a}_r \quad (3)$$

Onde:

\vec{D} é o vetor densidade de fluxo elétrico [C/m²];

Q é a carga na esfera interna [C];

r é o raio da esfera sob estudo [m], conforme Figura 4;

\vec{a}_r é o vetor unitário das coordenadas esféricas.

A equação 3 é limitada à região entre as duas esferas. Entretanto, é possível aplicar este mesmo princípio para todo o espaço, tomando como base que a esfera interna pode se tornar uma esfera de raio mínimo e a esfera externa pode ter um raio tendendo ao infinito. Assim, a equação (3) refere-se a uma densidade de fluxo para uma carga pontual. A equação do campo elétrico para uma carga pontual (HALLIDAY, 2009) é apresentada na equação (4).

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \times \vec{a}_r \quad (4)$$

Onde:

\vec{E} é o vetor campo elétrico [V/m];

ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$) [F/m];

Analisando as equações (3) e (4), é possível verificar que:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (5)$$

Entretanto, esta equação só é válida para o espaço livre.

2.3. Campo magnético

O campo magnético é o campo que envolve uma determinada massa, exercendo ações magnéticas. Na natureza, não existe uma massa magnética composta por apenas um polo, portanto toda massa magnética possui o polo norte e o polo sul, sendo um influenciado pelo outro (CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA, 2007).

A ação do campo magnético pode ser visualizada através das linhas de campo, que também são conhecidas por linhas de indução ou linhas de força do campo magnético. Quanto maior o número de linhas, maior a intensidade do campo magnético. Por convenção, adotou-se que as linhas de indução saem do polo norte em direção ao polo sul. A Figura 5 ilustra uma representação gráfica do comportamento destas linhas de indução para um ímã.

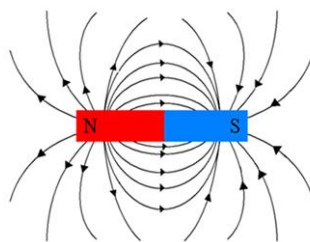


Figura 5. Representação gráfica das linhas de indução de um ímã (MARQUES, 2002).

Um experimento simples, entretanto muito eficiente para verificar as linhas de indução do campo magnético, é utilizar limalhas de ferro e um ímã. Ao se colocar o ímã em baixo de uma superfície, como por exemplo, um pedaço de papel, e colocar-se limalha de ferro na superfície superior do papel, é possível verificar o comportamento do campo magnético, como mostra a Figura 6.



Figura 6. Campo magnético de um ímã (MARTINS, 2004).

Outro exemplo típico da ação do campo magnético é a bússola, equipamento muito utilizado na navegação, e que tem seu princípio pela ação do campo magnético. Neste equipamento, um pequeno ímã, popularmente chamado por agulha, sempre indicará a direção norte, tendo em vista que a Terra possui um campo magnético próprio.

Pode-se imaginar a Terra se comportando como um ímã, possuindo um polo norte e um polo sul. O polo norte magnético da Terra é o polo sul geográfico e o polo sul magnético da Terra é o polo norte geográfico.

Uma vez que polos semelhantes se repelem e polos opostos se atraem, conforme Figura 7, o polo norte da agulha da bússola é atraído pelo polo sul magnético da Terra, portanto apontando o polo norte geográfico. A Figura 8

apresenta uma ilustração da bússola e os polos da Terra, enquanto que a Figura 9 apresenta uma bússola utilizada antigamente na navegação.

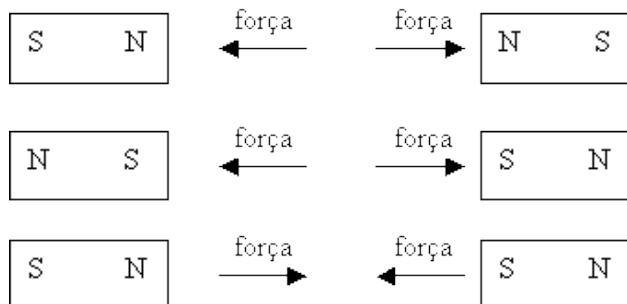


Figura 7. Comportamento dos polos de um ímã (ELEKTRON JUVENIL, 2012).

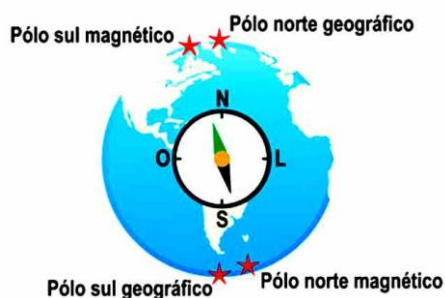


Figura 8. Ilustração da bússola e os polos da Terra (PORTAL SÃO FRANCISCO, 2012).



Figura 9. Bússola utilizada antigamente na navegação (ISTHMUS E-COMMERCE, 2012).

As equações (6), (7) e (8) apresentam, respectivamente, as equações para determinação do campo magnético para um condutor retilíneo comprido, uma espira circular e um solenoide.

$$\vec{H} = \frac{\mu_0 i}{2 \pi r} \quad (6)$$

Onde:

μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo ($4.\pi.10^{-7}$) [T.m/A];

i é a corrente elétrica que circula pelo fio condutor [A];

\vec{H} é o vetor campo magnético [A/m];

r é a distância do fio até a linha do campo magnético [m].

$$\vec{H} = \frac{\mu_0 i}{2 R} \quad (7)$$

Onde:

R é o raio da espira circular [m].

$$\vec{H} = \frac{\mu_0 i n}{l} \quad (8)$$

Onde:

n é o número de espiras do solenoide;

l é o comprimento do solenoide [m].

2.4. Densidade de fluxo magnético

O fluxo magnético (Φ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atravessam perpendicularmente uma determinada região ou área, conforme Figura 10.

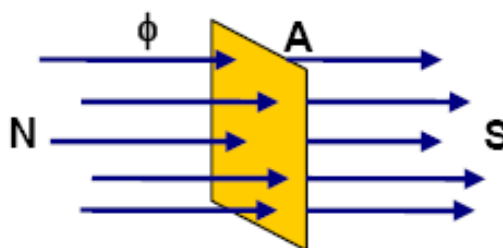


Figura 10. Fluxo magnético (CEFET-PE, 2012)

A equação (9) ilustra o fluxo magnético de uma determinada área.

$$\vec{\Phi} = \oint \vec{B} d\vec{A} \quad (9)$$

Onde:

$\vec{\Phi}$ é o Fluxo Magnético [Wb];

\vec{B} é a densidade do fluxo magnético [T];

\vec{A} é a área da seção perpendicular ao fluxo magnético [m²].

A Densidade de Fluxo Magnético representa o efeito da força magnetizante num dado meio conforme equação (10).

$$B = \mu H \quad (10)$$

Onde:

B é a densidade do fluxo magnético [T];

μ é a permeabilidade magnética do meio [T.m/A];

H é a intensidade do campo magnético [A/m].

A permeabilidade (μ) é a razão entre a permeabilidade do vácuo e a permeabilidade relativa do material ($\mu = \mu_0 \mu_r$) (TAVARES, 2009).

2.5. Equações de Maxwell

No dia 27 de outubro de 1864, Maxwell apresentou ao mundo científico sua primeira formulação de equações do eletromagnetismo que, posteriormente, ficaram conhecidas como as “Equações de Maxwell” (MARTINS, 2012).

As Equações de Maxwell partem do princípio que a força existente entre as cargas elétricas pontuais é proporcional ao produto destas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Outro princípio fundamental observado no eletromagnetismo corresponde ao fato de que um campo magnético variável sempre gera um campo elétrico e, um campo elétrico variável gera um campo magnético.

Com isto, as leis básicas da eletricidade e do magnetismo foram resumidas em quatro equações que também são conhecidas como:

- Lei de Gauss da Eletricidade;
- Lei de Gauss do Magnetismo;
- Lei da indução (de Faraday-Lenz);
- Lei de Ampère.

2.5.1. Lei de Gauss da Eletricidade

A Lei de Gauss da Eletricidade representa o fluxo do campo elétrico que atravessa uma superfície fechada, contendo carga elétrica em seu interior. Nesta lei, é fundamental o fato de que uma força elétrica é proporcional ao inverso do quadrado da distância das cargas. Com isto, o campo elétrico (E) não depende da superfície gaussiana, que é uma superfície fechada, normalmente com uma área conhecida.

Para a resolução de problemas envolvendo a Lei de Gauss, normalmente escolhe-se uma superfície conhecida, na qual pelo menos uma parte da superfície apresente campo elétrico com intensidade constante. Assim, o campo elétrico torna-se extremamente fácil de ser obtido.

Devido à simetria da carga, a Lei de Gauss é muito aplicável em casos com simetria planar, cilíndrica (ou axial) e esférica.

A simetria planar está presente na distribuição de cargas no plano infinito; por sua vez, a simetria cilíndrica aplica-se na distribuição linear infinita, normalmente aplicada a linha infinita de carga e cargas distribuídas num cilindro infinito. Enquanto que a simetria esférica é normalmente aplicada com carga puntiforme e distribuição esférica de cargas (UFRGS, 2003).

A Lei de Gauss pode ser expressa pela equação (11).

$$\Phi_E = \oint_S E \cdot dA \quad (11)$$

Onde:

A é a área da superfície gaussiana [m^2];

Φ_E é o fluxo total do campo elétrico [Nm^2/C].

Vale lembrar que uma carga elétrica no espaço sempre irá produzir um campo elétrico. Portanto, pode-se observar que para cada minúscula superfície da região gaussiana, teremos um vetor do campo elétrico e um vetor normal perpendicular a esta superfície, conforme Figura 11.

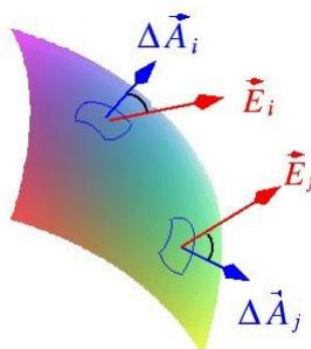


Figura 11. Superfície gaussiana envolvendo uma carga (PORTAL FÍSICA, 2012)

Então, a carga envolvida pode ser expressa pelo produto da permissividade do vácuo pelo fluxo elétrico, conforme equação (12).

$$q_{env} = \varepsilon_0 \Phi \quad (12)$$

Onde:

q_{env} é a carga envolvida [C].

Substituindo (11) em (12) temos:

$$q_{env} = \varepsilon_0 \oint_S E \cdot dA \quad (13)$$

$$\oint_S E \cdot dA = \frac{q_{env}}{\varepsilon_0} \quad (14)$$

Então, a carga envolvida pode ser expressa pelo produto da permissividade do vácuo pelo fluxo elétrico, conforme equação (12).

A Lei de Gauss também pode ser representada na forma diferencial, que expressa a magnitude de um campo vetorial num dado ponto, podendo ser expressa pela equação (15).

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (15)$$

Onde:

∇ é o operador nabla;

ρ é a carga [C].

2.5.2. Lei de Gauss do Magnetismo

O Fluxo magnético pode ser definido usando uma analogia com o fluxo elétrico (Lei de Gauss). Com isto, uma superfície foi dividida em vários elementos de área (dA). Esta superfície continha campo magnético, conforme Figura 12.

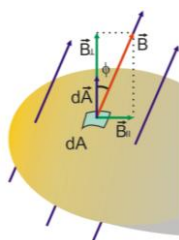


Figura 12. Superfície contendo fluxo magnético (FÍSICA B, 2003)

Assim, o elemento de fluxo magnético através de cada elemento de área pode ser expresso pela equação (16).

$$d\Phi_B = B \cdot dA \cdot \cos\phi = \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (16)$$

A soma de todos os elementos representa o fluxo magnético total, que pode ser expresso realizando a integral da equação (16), conforme é apresentado na equação (17).

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (17)$$

A Lei de Gauss do magnetismo expressa a ausência de monopolo do campo magnético. Portanto, a carga magnética no interior de uma superfície é igual a zero, e o fluxo total sobre esta superfície também é zero.

Este fato pode ser facilmente entendido, se for levado em conta que toda linha de campo magnético que sai da superfície, retorna para o seu interior. Portanto, as linhas de campo magnético sempre serão fechadas, conforme Figura 13.

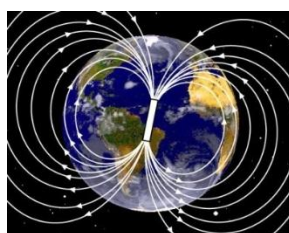


Figura 13. Linhas do campo magnético da Terra (ALEODIN, 2012).

Portanto, a Lei de Gauss do Magnetismo pode ser expressa pela equação (18), que representa o fluxo magnético através de uma superfície fechada.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (18)$$

Uma aplicação da Lei de Gauss do Magnetismo é para a determinação do fluxo magnético em uma superfície qualquer.

A Lei de Gauss do magnetismo também pode ser representada na forma diferencial, podendo ser expressa pela equação (19).

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (19)$$

2.5.3. Lei da Indução (de Faraday-Lenz)

O físico Michael Faraday, em seus estudos, descobriu que a variação do fluxo magnético próximo de um condutor gera uma diferença de potencial induzida neste mesmo condutor. Esta tensão induzida gera uma corrente, denominada de corrente induzida, que cria um fluxo magnético oposto à variação do fluxo inicial.

A variação do campo magnético pode ocorrer de vários modos:

- Variando o campo magnético da fonte magnética;
- Afastando a fonte magnética do condutor;
- Aproximando da fonte magnética do condutor;
- Variando a área da espira;
- Girando a espira.

Se não ocorrer variação do fluxo magnético (e campo magnético), não existirá uma corrente induzida. A indução eletromagnética rege o princípio de funcionamento dos motores elétricos, transformadores e geradores.

Faraday, entretanto, não conseguiu chegar a uma lei que determinava o sentido da corrente induzida.

No ano de 1834, o físico russo Heinrich Lenz demonstrou uma regra que permitia indicar o sentido da corrente induzida, com base na Lei de Lenz. Esta lei diz que quando um ímã se aproxima de uma espira, surge, nesta espira, uma corrente induzida. Por sua vez, esta corrente induzida produz um campo magnético que possui sentido oposto ao campo magnético que a gerou. Esta lei é popularmente conhecida entre os físicos como a “Lei do Contra”, pois o sentido da corrente é o oposto da variação do campo magnético que a originou.

A Figura 14 ilustra a corrente induzida originada por um ímã.

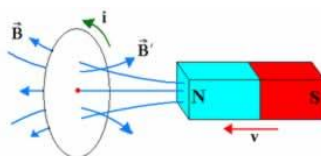


Figura 14. Corrente induzida criada pelo campo magnético do ímã (DA SILVA, 2012).

Nesta figura, é possível observar que um ímã apresenta uma densidade de fluxo magnético \vec{B} , que é representada pelas linhas de campo com setas da esquerda para direita. Ao se aproximar este ímã da espira, o campo magnético \vec{B} criado pelo ímã faz com que o fluxo magnético no interior da espira aumente. A corrente induzida na espira cria um campo magnético \vec{B}' com valor contrário ao fluxo magnético \vec{B} , possuindo, portanto um fluxo contrário àquela que o gerou (DA SILVA, 2012).

De acordo com a Lei de Lenz, existem quatro possibilidades para determinar o sentido da corrente induzida, sendo elas:

- Polo sul do ímã sendo aproximado da espira;
- Polo norte do ímã sendo aproximado da espira;
- Polo sul do ímã sendo afastado da espira;
- Polo norte do ímã sendo afastado da espira.

A Figura 15 ilustra estas quatro possibilidades.

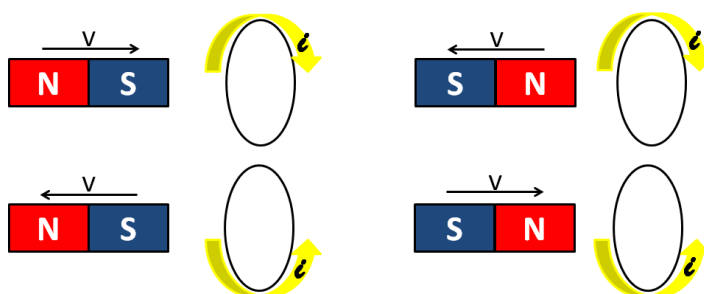


Figura 15. Sentido das correntes de indução

O sentido da corrente induzida é determinado pela regra da mão direita, na qual posiciona-se a mão direita com o polegar apontado no sentido da corrente convencional de um fio e os demais dedos apontam o sentido do campo magnético (HALLIDAY, 2009). A Lei de Faraday diz que a força eletromotriz (\mathcal{E}) que é induzida em uma espira é proporcional à variação do fluxo magnético $d\Phi_B$ que a atravessa, conforme equação (20) (HALLIDAY, 2009).

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (20)$$

Onde:

\mathcal{E} é a força eletromotriz [V].

A Lei da Indução expressa o campo magnético variável, que pode ser representada na forma diferencial, conforme equação (21).

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (21)$$

A equação (20) possui dois erros, o primeiro é que o sinal desta equação deveria ser positivo e não negativo, o segundo erro refere-se a sua forma dimensional, pois de acordo com o Sistema Internacional (S.I.) não está dimensionada corretamente. A equação (22) apresenta a Lei de indução de Maxwell corrigindo estes dois erros (HALLIDAY, 2009).

$$\oint B_E \cdot ds = +\mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (22)$$

2.5.4. Lei de Ampère

A Lei de Ampère recebe este nome em homenagem ao físico francês André-Marie Ampère que apresentou-a em 1826, e é utilizada para calcular a indução magnética em sistemas que possuem simetria. Esta lei expressa a geração de campos magnéticos oriunda de correntes elétricas, conforme Figura 16, na qual a integral de linha de uma superfície fechada contendo campo magnético é proporcional à corrente que atravessa esta superfície, conforme equação (23).

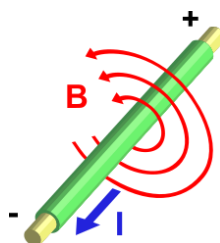


Figura 16. Campo magnético provocado por uma corrente (WIKIMEDIA, 2009).

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 i \quad (23)$$

A Lei de Ampère é semelhante à Lei de Gauss (11) no que se refere à solução de problemas práticos. A diferença entre elas é que a Lei de Gauss expressa a integral de superfície enquanto que a Lei de Ampère expressa a integral de linha, limitando, assim, a utilização desta lei em problemas práticos. Com isto, a Lei de Ampère é muito utilizada para calcular campos magnéticos gerados por corrente que apresentem uma simetria que permite uma fácil determinação da integral de linha.

Anos após, Maxwell introduziu algumas modificações na Lei de Ampère, deixando-a mais geral, incluindo a geração do campo magnético através da variação do campo elétrico, recebendo o nome de Lei de Ampère-Maxwell.

Sendo assim, o campo magnético pode ser gerado por uma corrente e/ou pela variação do fluxo elétrico.

A lei de Ampère-Maxwell pode ser expressa pela equação (24).

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (24)$$

A Lei de Ampère-Maxwell expressa a fonte do campo magnético, que pode ser representada na forma diferencial, conforme equação (25).

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (25)$$

Onde:

\vec{J} é a densidade de corrente livre.

2.6. Efeito Corona

O Efeito Corona também é conhecido como “Fogo de Santelmo” que vem de Santo Elmo, padroeiro dos marinheiros. Este nome surgiu quando antigos marinheiros observavam mastros de navios envolvidos por uma leve luz. Esta luz era mais visível em regiões tropicais e em ocasiões que antecipavam as tempestades. Este fenômeno ocorria, pois as nuvens eletrizadas induziam cargas elétricas nas pontas dos mastros, fazendo surgir uma coroa luminosa. Para os antigos marinheiros este fenômeno era considerado como aparição divina (R7, 2011).

O Efeito Corona é caracterizado por descargas elétricas que ocorrem em sistemas de energia como resultado da ionização causada por um intenso campo elétrico associado a um condutor de alta tensão, sem que ocorra a formação de um caminho condutivo entre condutores, ou entre condutor e terra. O valor da intensidade de campo elétrico para o surgimento do Efeito Corona diverge entre pesquisadores, sendo que a referência (PEEK, 1915) cita valores acima de 15 kV/cm, enquanto que para a referência (MELLO, 2007) este valor é de 30 kV/cm. Este valor ainda sofre muita variação quando submetido a alterações do ambiente, como partículas de ar, poeira, umidade e chuva.

A ocorrência do Efeito Corona deve-se à circulação da corrente ocorrer na superfície do condutor. Com isto, os elétrons ionizam o ar em sua volta,

produzindo o efeito luminoso conhecido como coroa. Estas luzes estão presentes na faixa de comprimento de onda variando de 200 nm a 400 nm (STOLPER, HART e MAHATHO, 2006). O Efeito Corona está diretamente ligado à geometria da superfície, ocorrendo principalmente nas pontas, local onde a densidade superficial de cargas elétricas é muito maior que em superfícies arredondadas, conforme ilustra a Figura 17.

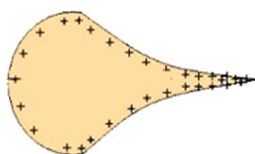


Figura 17. Superfície com geometria contendo pontas (UNESP, 2012)

Este efeito inicia-se por um campo elétrico que acelera os elétrons livres existentes neste local. Estes elétrons adquirem energia suficiente e, após se chocarem com outros átomos, ocorre a geração de novos elétrons, ocorrendo, assim, o processo de ionização por impacto.

Os elétrons livres, quando colidem com os átomos de oxigênio, nitrogênio e outros gases perdem parte da sua energia cinética. Entretanto, um elétron pode atingir um átomo com força tal que acaba gerando energia mais alta. Os elétrons perdem parte de sua energia, entretanto o átomo atingido pode reverter ao seu estado inicial, liberando esse excesso de energia em forma de calor, luz, energia sonora e radiações eletromagnéticas. A Figura 18 ilustra este processo de ionização.

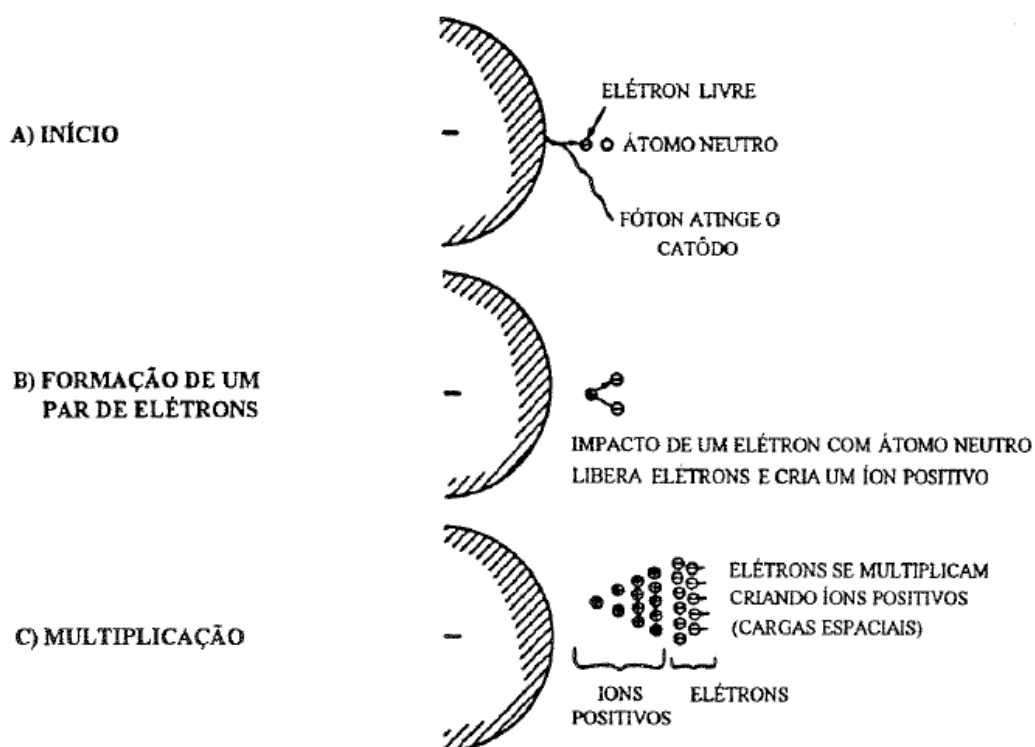


Figura 18. Processo de ionização (MIRANDA, 1994)

O Efeito Corona pode reduzir a vida útil do isolamento de equipamentos, além de ocasionar interferências em sistemas de medição, controle e comunicação (HEINRICH, 1964). Estudos comprovam que quanto maior o nível de potencial elétrico, maior é o Efeito Corona gerado (LEÃO, 2008). Mais ainda, esse efeito é responsável pela perda de energia elétrica de centenas de kW/km nas LT's (MELLO, 2007).

Em linhas de transmissão de extra alta tensão, o Efeito Corona pode gerar a radiointerferência e o ruído acústico (GENERAL ELECTRIC CO. PROJECT EHV, 1982). O ruído acústico em linhas de transmissão de classe de tensão acima de 500 kV causa um barulho que é caracterizado como poluição acústica, aspecto que deve ser considerado no projeto destas linhas.

O ruído audível é composto por duas componentes, uma caracterizada por uma banda de alta frequência e a outra por tons de baixa frequência sobrepostos ao ruído de banda larga, podendo chegar a 65 dBm (MELLO, 2007). Os primeiros trabalhos referentes a este tema datam de 1932 (MCMILLAN, 1932).

Já a radiointerferência encontra-se dentro da faixa de frequência de 300 kHz a 3 GHz, sendo que trabalhos iniciais relacionados a este fenômeno datam de 1930 (ADAMS, 1956).

O Efeito Corona pode ser originado também por surtos de sobretensões provenientes de descargas atmosféricas ou operações de manobras e chaveamento. Existe uma norma brasileira que impõe o valor máximo admissível de interferência provocado pelas linhas de transmissão. Esta norma é a NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – Procedimento (ABNT, 1985).

O Efeito Corona também ocorre em outros componentes da linha como ferragens e isoladores. A Figura 19 apresenta o Efeito Corona em uma cadeia de isoladores, durante o ensaio de Corona em laboratório, enquanto que as Figuras 20 e 21 apresentam o Efeito Corona através de uma câmara corona DayCor® (DAYCOR®, 2008).



Figura 19. Efeito Corona em uma cadeia de isoladores (MELLO, 2007).



Figura 20. Efeito Corona visualizado através da câmara DayCor® (DAYCOR®, 2008).



Figura 21. Efeito Corona em uma mufla visualizado através da câmara DayCor® (DAYCOR®, 2008)

2.7. Isoladores de Alta Tensão

Em um sistema de transmissão de energia elétrica, os isoladores estão diretamente associados ao nível de segurança da rede (sistema), pois sua falha influencia diretamente nos índices DEC (Duração de Interrupção Equivalente em horas) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção) da concessionária de energia perante a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (NIGRI, 1999).

O indicador DEC informa a quantidade de horas em média por ano que o consumidor fica sem energia elétrica, enquanto que o indicador FEC representa quantas vezes em média a energia elétrica faltou para os consumidores. Estes indicadores servem para monitorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica, sendo auditados pela ANEEL (CIDE, 2010).

Os isoladores, por sua vez, possuem a finalidade de isolar um corpo energizado de outro corpo, seja eletrificado ou não. Atualmente, existem isoladores de diversos tipos, modelos e classes de tensão.

Estudos revelam que aproximadamente 60% dos desligamentos ocorridos em uma linha de transmissão com classe de tensão, igual ou superior a 230 kV, é ocasionado devido a falhas nos isoladores (GARCIA e SANTOS FILHO, 2003). As interrupções no fornecimento de energia elétrica nas linhas de transmissão ocasionadas por atos de vandalismo é uma realidade nacional e internacional. Prova disto são os números divulgados pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), apontando que durante os anos de 1988 e 2001, 75% dos desligamentos nas LT's foram provocados por vandalismo (YANAGUIZAWA e

SHINOHARA, 2011). Estes isoladores que sofrem vandalismo são fabricados de vidro ou porcelana e a principal causa de vandalismo é ocasionada por projéteis de arma de fogo. Uma alternativa a este tipo de vandalismo é o isolador polimérico, que além desta vantagem, possui vários outros benefícios em comparação aos materiais citados (vidro e porcelana).

Os isoladores poliméricos começaram a ser fabricados na década de 80, surgindo, assim, a primeira versão para os isoladores poliméricos para LT (NERI, DA COSTA, *et al.*, 2005). Os isoladores poliméricos são fabricados possuindo um bastão de fibra de vidro, que possui alta resistência mecânica, no qual são grimpados os terminais de aço, sendo revestido por borracha de silicone, que possui alto desempenho como isolante elétrico, obtendo, assim, um isolador altamente confiável, com características otimizadas, leve, com excelente desempenho eletromecânico, elevada resistência a intempéries e com excelente vedação (BALESTRO, 2010). Outro aspecto que vale ser mencionado em isoladores poliméricos é a sua característica de hidrofobicidade ser muito superior aos materiais de vidro e porcelana.

A hidrofobicidade representa a característica do material em repelir água, conforme Figura 22, sendo necessária para que o isolador, em suas aletas, não forme um caminho de acúmulo de água, poeira, poluição e outras substâncias, reduzindo, assim, a isolação do mesmo, possibilitando a formação de trilhamento elétrico (THOMAZINI, 2009).

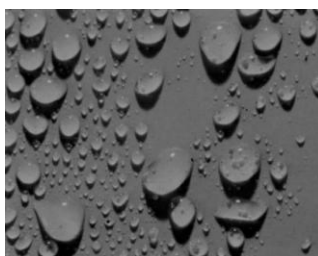


Figura 22. Ensaio de hidrofobicidade em isolador polimérico (THOMAZINI, 2009).

Os isoladores poliméricos possuem menores dimensões e pesos muito inferiores, quando comparados com os isoladores fabricados por vidro e/ou porcelana.

A Figura 23, demonstra uma cadeia de isolador de 138 kV e um isolador composto polimérico da mesma classe de tensão. A cadeia de isoladores na parte superior da figura é composta por 9 discos isolantes de porcelana e 2 discos isolantes de vidro, enquanto que na parte inferior da figura é mostrado um isolador polimérico da mesma classe de tensão, que substitui os 11 discos isolantes que compõem a cadeia da classe de 138 kV.



Figura 23. Comparativo entre isoladores da classe de tensão de 138 kV (MANARA, 2012).

Nos isoladores, o Efeito Corona também está presente e é responsável pela formação de ozônio que é uma das principais causas de corrosão em isoladores (MELONI, ANDREOLLI e KOBAYASHI, 1997), seja em suas ferragens ou em seu núcleo de fibra de vidro, quando os mesmos são utilizados em isoladores poliméricos, conforme pode ser visualizado nas Figuras 24, 25, 26 e 27.



Figura 24. Isolador com sinais de corrosão (MELLO, CARDOSO e GONÇALVES, 2010).



Figura 25. Isolador com erosão na ferragem ocasionada pelo Efeito Corona (EKLUND INFRARED INC, 2009).



Figura 26. Isolador com erosão no núcleo ocasionado pelo Efeito Corona (EKLUND INFRARED INC, 2009).



Figura 27. Isolador com erosão no tarugo de fibra de vidro (EKLUND INFRARED INC, 2009).

A utilização de anéis anti-corona em isoladores poliméricos é necessário para classe de tensão igual ou superior a 138 kV (FERRARO e DOHLEMAN, 2010). Este acessório pode ser fabricado por qualquer material condutor (alumínio, ferro) e apresenta vários formatos, sendo o mais usual o de tubo circular, conforme demonstrado na Figura 28.

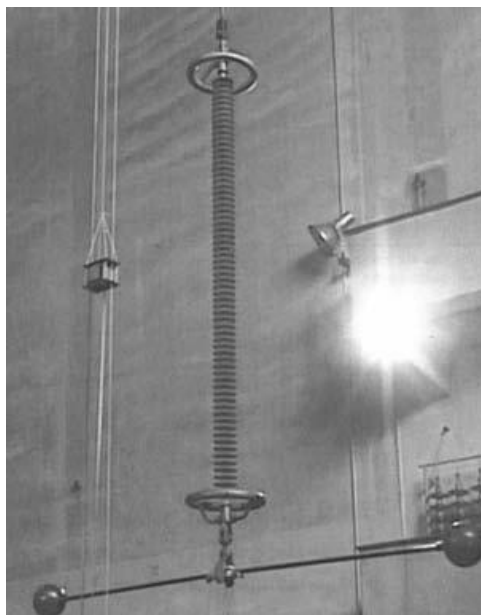


Figura 28. Isolador contendo anel anti-corona (SCHUMANN, BARCIKOWSKI, *et al.*, 2009)

Além de mitigar a intensidade do campo elétrico, o anel anti-corona pode ajudar em reduzir a corrente de fuga do isolador que não apresentará uma erosão prematura. A corrente de fuga em isoladores é um parâmetro que está sendo estudado pela CELPE (Companhia Energética de Pernambuco) que realiza um projeto piloto juntamente com o CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações) (MENDONÇA, ANGELINI, *et al.*, 2010), com o intuito de determinar a vida útil dos isoladores. Este é um dos possíveis serviços abrangidos pelo conceito em *smart grid*, que fornecerá inúmeros serviços e soluções para as diversas concessionárias do país, sendo que as soluções serão de acordo com a necessidade de cada concessionária.

3. SMART GRID

Smart grid, a chamada “rede inteligente”, não é apenas um conjunto de produtos ou redes, mas sim um conceito tecnológico que apresenta uma rede elétrica com uma arquitetura que integra equipamentos inteligentes e redes de comunicação de dados em um sistema gerenciado de computação distribuída, abrangendo toda a corporação e a indústria, envolvendo os ativos elétricos, sistema de telecomunicações e tecnologia de informação (TI) (JATOBÁ, 2007).

De acordo com o conceito de *smart grid*, é necessário que a rede tenha alguns recursos (JATOBÁ, 2007):

- Medidores Inteligentes;
- Comunicações Bi-direcionais;
- Portal do Consumidor;
- Habilitação de Rede Interna aos Clientes (*Home Area Network*);
- Gerenciamento das Medições em Tempo Real;
- Programas de Gerenciamento de Demanda;
- Aplicativos de Serviços aos Clientes;
- Aplicativos dos Portais Operacionais.

Toda essa estrutura dá condições para implantação de capacidades avançadas do sistema de energia, como energia auto-recuperável, comunicação avançada com o consumidor e informação em tempo real sobre energia e fluxo de geração. Essa filosofia de redes inteligentes não é exclusiva para sistemas de energia elétrica, podendo ser utilizada para fornecimento de produtos que são enviados por outras redes, como de água e gás (JATOBÁ, 2007).

Na Figura 29 é apresentada uma rede com a estrutura de *smart grid* que apresenta inúmeras vantagens por dar condições de monitorar e controlar toda a rede, tais como localizar pontos de perda de energia elétrica por defeitos em dispositivos, rastrear furtos por conta de ligações clandestinas na rede, desligar clientes por falta de pagamento. Outra importante vantagem advinda desta

arquitetura consiste na possibilidade dos consumidores residenciais utilizarem recursos próprios de energia a partir de fontes renováveis. A ideia é que o consumidor residencial utilize recursos de geração próprios e, na eventualidade desses recursos não serem suficientes para o suprimento de sua demanda, possa fazer uso da energia fornecida pela rede elétrica. Já em casos onde a energia gerada por recursos próprios é maior que a demanda do consumidor, ela pode ser “enviada” através da rede para suprir a demanda de outro consumidor.

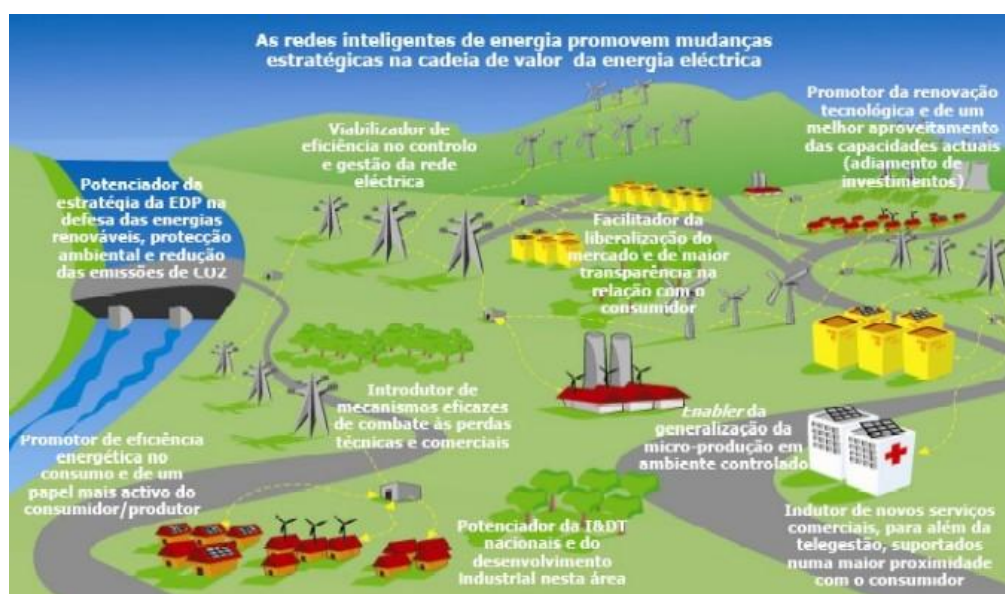


Figura 29. Rede com a estrutura *smart grid* (AIRES, 2009)

3.1. História do conceito *smart grid* em redes elétricas

Na década de 80, surgiram os medidores de leitura automáticos (AMR - “*Advanced Meter Reading*”) para monitorar cargas de clientes com grande consumo de energia elétrica, podendo fazer o levantamento de consumo, demanda e tempo de uso dos consumidores. Esses medidores tinham comunicação contínua e, assim, eram capazes de fazer o monitoramento em tempo real, sendo um recurso de base para uma infra-estrutura de medição avançada (AMI – “*Advanced Meter Infrastructure*”), com dispositivos com funcionamento “inteligente”. Esse modelo de infraestrutura teve início no ano de 2005 (KELLY, 2006).

Em 2000, iniciou-se o controle de funcionamento de alguns dispositivos industriais e domésticos de ar condicionado, refrigeradores e aquecedores, adaptando o ciclo de ativação em determinados horários de pico. O projeto de telegestão, sistema instalado pela Enel SpA, da Itália, fez o primeiro projeto para uma rede de grande porte, com 27 milhões de residências que utilizavam esses medidores inteligentes com comunicação via banda larga de baixa potência (BPL – “Broadband Power Line”). Esses medidores, além da utilização para energia elétrica também estavam sendo utilizados para leitura do consumo de água e gás. A empresa desenvolveu e fabricou seus próprios medidores, atuou como um integrador de sistema próprio e desenvolveu seu próprio sistema de software. O projeto é considerado como o primeiro exemplo concreto da utilização comercial da tecnologia *smart grid* para residências. Foi concluído em 2005, com custo de 2,1 bilhões de euros e proporcionou uma economia de 500 milhões de euros para o sistema elétrico (ÁVILA, 2010).

Nos Estados Unidos, a cidade de Austin no Texas vem trabalhando na construção de seu *smart grid* desde 2003, quando um terço dos seus medidores antigos foram substituídos por medidores inteligentes, com cerca de 200 mil dispositivos de controle de tempo real que, além de medidores inteligentes, também incluíam termostatos inteligentes e sensores na área de serviço. A expectativa do projeto era de suportar 500 mil dispositivos atuando em tempo real, em 2009, incluindo 1 milhão de consumidores e 43 mil empresas. Boulder, no estado do Colorado, completou a primeira fase de seu projeto *smart grid* em agosto de 2008. Ambos os sistemas, de Boulder e Austin, utilizavam medidores e dispositivos inteligentes como recursos para entrar na rede doméstica (HAN – “Human Area Network”), que controlam tomadas inteligentes, dispositivos elétricos e eletrônicos como: chuveiro, televisão, aparelho de som, vídeo game, entre outros (MESSIAS, 2007).

A HydroOne, companhia de energia elétrica, em Ontário, no Canadá está no meio de uma iniciativa em larga escala de *smart grid*: a implantação de uma infra-estrutura compatível com os padrões de comunicação da Trilliant, que é a empresa líder em comunicações de smart grid no fornecimento de soluções para eficiência energética. Até o final de 2010, o sistema tinha a expectativa de servir

1,3 milhões de clientes na província de Ontário. A iniciativa ganhou o "Best AMR iniciativa na América do Norte" prêmio da *Utility Planning Network* (LONTOH, 2008).

3.2. *Smart grid* no mundo

Existe um interesse global na utilização do conceito de *smart grid*. Uma prova disso é a quantidade de projetos de medição inteligente que estão em andamento em toda a Europa, América do Norte, Oceania, Ásia e algumas iniciativas na América do Sul e África (CNET NEWS, 2010) (CONTROLS, 2012).

Na Figura 30, pode-se visualizar os projetos, testes ou pilotos que estavam em andamento no mês de setembro de 2009, observando que são apresentados projetos, testes ou pilotos voltados à eletricidade, gás e água, levando em conta a seguinte codificação (CHRISTINE, 2010):

- AMI = *Advanced Meter Infrastructure*
- AMR = *Advanced Meter Reading*
- SMART GRID = "Rede Inteligente"
- Vermelho = eletricidade
- Verde = gás
- Azul = água
- Triângulo = teste ou piloto
- Círculo = projeto



Figura 30. Mapa contendo os projetos, testes ou pilotos de *smart grid* no mundo (ALCÂNTARA, 2009)

A China lidera em grandeza de investimentos dos governos em 2009, com um total de US\$ 7,323 bilhões; os Estados Unidos vem em segundo lugar com um investimento de US\$ 7,092 bilhões. A partir de uma perspectiva regional, tem-se a região da Ásia/Pacífico com um investimento combinado de US\$ 10 bilhões com a região EMEA (Europa, Oriente Médio e África). De acordo com a Agência Internacional de Energia, é necessário um valor estimado de US\$ 16 trilhões em investimentos no setor de energia para 2003 – 2030 (LOPES e GONZALEZ, 2010).

Na Europa, são necessários 500 milhões de euros em investimento para atualizar o transporte de eletricidade e de infra-estrutura de distribuição (LOPES e GONZALEZ, 2010).

Os políticos de todos os países, reconhecem que os investimentos em *smart grid* irão proporcionar melhoras na segurança energética e estimularão as economias locais, com novas empresas e empregos, além de reduções de emissão de gases de efeito estufa (SICSÚ e CASTELA, 2010). De fato, a implantação de tecnologias de *smart grid* corresponde a um investimento de longo prazo, e será de importância vital educar os consumidores sobre os benefícios

estratégicos destes investimentos que proporcionará redução nas tarifas de energias elétricas, além de utilizar os recursos naturais de forma racional.

Os países que tiverem capital para investir na aplicação da tecnologia vão obter diversos benefícios, tais como: utilização de energia limpa de fontes renováveis, como solar e eólica, criação de indústrias, criação de combustíveis, melhoria da qualidade dos serviços das concessionárias de energia, entre outros (CHRISTINE, 2010).

Na Alemanha, do final de 2008 até 2010, existia a expectativa de instalação de 1000 medidores inteligentes com *displays*, em residências de consumidores na cidade de Stadtwerke e, na cidade de Düsseldorf, existe um projeto para utilização de 10 concentradores PLC (REDE INTELIGENTE, 2009).

Nos Estados Unidos, a empresa National Grid realizará um projeto piloto com 42 mil consumidores, em 6 cidades (Worcester, Albany, Syracuse, Newport, Jamestown e Portsmouth), onde as instalações realizarão comunicação de via dupla, conexão e desconexão remotas, alarme de violação a equipamentos de *smart grid*, além de testar a comunicação via Rádio *Mesh*, *Wimax* e *ZigBee* (NATIONALGRID, 2010).

Na América do Sul, até setembro de 2009, só havia 3 projetos, sendo 2 no Brasil e 1 na Argentina. Na África do Sul não havia previsão de projetos nessa época. Em 2012, no Brasil, praticamente todas as concessionárias possuem projetos em *smart grid*, sendo que estes projetos vêm de encontro com as necessidades locais de cada concessionária (SENDI, 2012).

3.3. *Smart grid* no Brasil

A necessidade de implantação da tecnologia de *smart grid* no Brasil, visando o aumento da eficiência energética está cada vez mais sendo necessária, principalmente pelo aumento de consumo de energia elétrica.

O consumo nacional de energia elétrica vem aumentando significativamente com o passar dos anos. Em janeiro de 2010, o Brasil teve um

consumo médio da ordem de 68 GigaWatts (GW) no horário de pico, o que representa um aumento de 9,1% em relação a janeiro de 2009 e 26,4% acima da média de consumo de todo o ano anterior. Com esse aumento, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) determinou que a Petrobrás acionasse diversas usinas termelétricas a gás, o que impacta, também, no meio ambiente, pois é uma forma de geração mais poluente (ORDOÑEZ, 2010). No ano de 2010, o consumo de energia elétrica nos setores industrial e comercial teve aumento respectivamente de 13,2% e 8,7%, em relação ao ano de 2009. O consumo residencial brasileiro, em 2010, teve um aumento de 7,5% em relação ao ano de 2009, o que se trata do maior valor mencionado em um mês de Janeiro, chegando a 9,237 GWh. Esse aumento do consumo no mês de janeiro é reflexo das altas temperaturas comuns a esse período do ano, com a consequente utilização de aparelhos de refrigeração (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2010).

Além do aumento de consumo, outro item que afeta a geração e a quantidade de energia transmitida na rede são as perdas técnicas e perdas não técnicas na distribuição. Essas perdas podem ser monitoradas, utilizando o conceito de *smart grid*. As perdas técnicas são as perdas geradas a partir das características físicas da estrutura da rede. Já as perdas não técnicas são as perdas relacionadas a ações externas à estrutura. Nas perdas não técnicas comerciais, a Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica (ABRADEE) faz distinção entre fraude e furto. A fraude ocorre na alteração do funcionamento dos equipamentos de medição, visando redução no registro de demanda e/ou consumo, induzindo a concessionária ao erro. As infrações ocorrem quando há troca nas ligações de medições que fazem o disco “girar” para trás, bloqueio do disco do medidor, entre outras causas. No caso do furto, é subtraída energia elétrica das redes da concessionária sem medição e com prejuízo desta. A ligação clandestina e desvio de energia são citados como exemplos de furtos muito comuns no Brasil. O Brasil apresentou uma perda alta de energia na rede de distribuição, da ordem de 18,5% em relação à energia gerada, o que representa um valor acima da porcentagem de perda da América, que é o continente que tem o maior índice no mundo, como demonstra a Figura 31.



Figura 31. Gráfico de perdas totais na distribuição de energia elétrica (ALCÂNTARA, 2010)

Outra possível aplicação do conceito de *smart grid* seria no desligamento seletivo, sendo que falhas nessa área podem ocasionar grandes prejuízos à sociedade como um todo. Basta lembrar o fato marcante, ocasionado também pela falta de desligamento seletivo, ocorrido em novembro de 2009, ocasionando um *blecaute* que afetou 18 estados e deixou milhares de pessoas no escuro (FOLHA ONLINE, 2010). Atualmente, existem eventos e fóruns cujo interesse consiste em fornecer subsídios relacionados ao conceito de *smart grid* aos profissionais que atuam no mercado de energia da América Latina, sejam eles de concessionárias, grandes consumidores e produtores de energia, governos, agências reguladoras, fabricante de equipamentos, provedores de sistema e solução de medição, controle, automação e entidades de pesquisa e desenvolvimento (P&D).

De acordo com o presidente do Fórum Latino-Americano de Smart Grid e da ECOee, Cyro Boccuzzi, “o conceito de rede inteligente envolve três pilares”. O primeiro deles são os ativos elétricos, como chaves, medidores, cabos, transformadores e disjuntores. O segundo pilar é o sistema de telecomunicações, que capta informações da operação em tempo real e traz esses dados para uma otimização dinâmica. O último pilar é a tecnologia de informação, que abrange todos os sistemas de controle de gestão das empresas (JADJISKI, 2011).

O investimento que as concessionárias precisam fazer para operar com uma rede com tecnologia de *smart grid* está justamente relacionado a esses três

pilares, sendo que qualquer alteração na estrutura da rede precisa ter uma validação da ANEEL. Um passo de grande importância para a regulamentação dos medidores eletrônicos em unidades consumidoras de baixa tensão foi fazer a consulta pública um pouco diferente, de acordo com o superintendente de Relação dos Serviços de Distribuição da agência, Paulo Henrique Silvestri Lopes (JADJISKI, 2011). Nessa consulta pública, participaram entidades como a Associação Brasileira da Indústria Eletroeletrônica e a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica e a Distribuidoras AES Eletropaulo, Ampla, CPFL Energia, Coelce (CE), Elektro (SP) e Grupo Rede Energia, entre outras. A informação do superintendente, é que a consulta foi mais provocativa, para que os interessados respondessem e contribuíssem com sugestões sobre o tema, para que com isso, fosse formulada uma proposta e colocada em audiência pública. A Figura 32 ilustra toda a estrutura que forma uma rede inteligente com todos os recursos que podem estar ligados a ela.

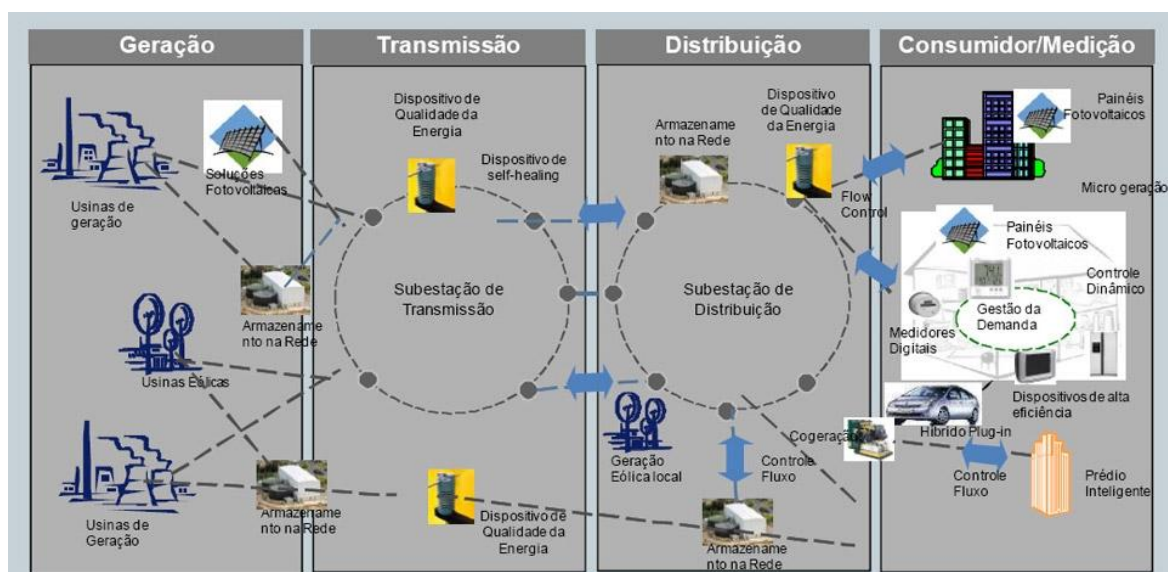


Figura 32. Estrutura de uma rede inteligente (ALCÂNTARA, 2010)

3.4. A visão das concessionárias de energia elétrica

As concessionárias de energia elétrica estão estudando a fundo o novo conceito de rede que está sendo implantado em diversos países por todo o mundo, e tentando buscar as melhores tecnologias disponíveis no mercado. A

CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) ENERGIA, é a única representante da América Latina que faz parte do Global Intelligent Utility Network Coalition, que estuda a aplicação do *smart grid* nas redes e também, atua juntamente com 11 distribuidoras de países como Estados Unidos, Índia e Austrália que têm um planejamento de trabalho que visa automatizar 100% das empresas em 10 anos. De acordo com o Diretor de Engenharia e Gestão de Ativos da companhia, Rubens Bruncek, talvez não seja tão vantajoso o investimento na substituição dos medidores, pois a perda da energia elétrica está entre 2% e 2,5%, e o número de clientes é de 6,5 milhões, o que demandaria um enorme trabalho associado à substituição dos medidores (JADJISKI, 2011).

A AES Eletropaulo também está com um grupo de trabalho, visando à adoção de tecnologias de *smart grid*. Entre os estudos desenvolvidos estão um piloto do conceito de *smart grid* em duas subestações e uma parcela atípica de rede de distribuição, com soluções para automação, autorrecuperação, detecção de falhas, controle de carga, medição remota e gestão pelo lado da demanda, além do estudo paralelo de medição para exteriorização com as funcionalidades de telemedição, corte e religamentos remotos (BOCCUZZI, 2007).

As concessionárias estão aguardando a determinação da ANEEL, com relação aos medidores. Atualmente, existem projetos em relação à implantação do conceito de *smart grid* na rede, mas as dúvidas estão relacionadas ao custo do medidor e qual o tempo para fazer a substituição, para que possam fazer um estudo orçamentário para escolha de fornecedores, investimento distribuído no tempo e se haveria impacto ou não na tarifa dos consumidores. De acordo com a ANEEL, serão trocados 2,5 milhões de medidores básicos por medidores eletrônicos que medem apenas potência. Os medidores que devem ser instalados no conceito de *smart grid* são medidores que tenham outras funcionalidades como medição de interrupção, fator de potência e monitoramento de consumo distribuído no tempo. A intenção dessa substituição é monitorar cada etapa do processo (Geração, Transmissão e Distribuição), onde poderiam ser feitas a previsão e redução de falhas e a operação em tempo real, o que necessitaria de recursos de telecomunicações e tecnologia da informação.

O estudo de qual medidor deve ser utilizado dentro do conceito de *smart grid* e como será feita a substituição dos medidores atuais é algo que as concessionárias devem se preocupar para implantar a estrutura de rede inteligente. Entretanto, as alterações na estrutura da rede necessárias à implantação do conceito de *smart grid* correspondem a um universo muito maior, pois é necessária a instalação de dispositivos telecomandados, como chaves, disjuntores e outros dispositivos de proteção, seja nas redes primárias, secundárias e nas subestações, o que envolve um altíssimo investimento em equipamentos. Outro ponto a ser analisado é a adequação dos sistemas utilizados para coleta de informações, sejam elas a energia consumida pelos clientes, ou mesmo a detecção de eventos ocorridos na rede (como atuação de dispositivos de segurança, evento que ocorra por intervenção de um corpo externo à rede) conciliando o que é utilizado com os recursos adicionais que a rede inteligente oferece, envolvendo trabalho grande com relação aos recursos de TI. E para fazer a parte de comunicação de toda a estrutura física da rede com toda a parte de sistema utilizado pela concessionária, entram os recursos de telecomunicações, que envolvem o meio com que as informações de campo chegam às concessionárias e como é feita a intervenção da mesma no campo.

O Ministério de Minas e Energia (MME) criou um grupo de trabalho para analisar e identificar ações necessárias para subsidiar o estabelecimento de políticas públicas para a implantação de um Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente, conhecida como *smart grid*. Entre os aspectos abordados na proposta estão (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2010):

- Estado da arte de programas do tipo *smart grid*, no Brasil e em outros países;
- Adequação das regulamentações e das normas gerais dos serviços públicos de distribuição de energia;
- Identificação de fontes de recursos para financiamento e incentivos à produção de equipamentos no país;
- Regulamentação de novas possibilidades de atuação de acessantes no mercado, o que inclui a possibilidade de usuários operarem tanto

como geradores de energia, através da geração distribuída, quanto como consumidores.

Segundo a portaria 440, publicada no Diário Oficial da União de 16 de Abril de 2010, o grupo será composto por representantes do MME, da Empresa de Pesquisa Energética, do Centro de Pesquisas em Energia Elétrica, da Agência Nacional de Energia Elétrica e do Operador Nacional do Sistema Elétrico. Órgãos e entidades do setor que possam oferecer contribuições poderão ser convidados para participar eventualmente.

Mesmo o Brasil não possuindo, ainda, uma estrutura de rede inteligente, as concessionárias de energia elétrica tentam automatizar ao máximo sua rede, pois isso proporciona velocidade na resolução de alguns problemas, impactando na avaliação da concessionária, pela ANEEL, de acordo com, indicadores de qualidade de serviços prestados. Esses indicadores estão relacionados ao tempo que a concessionária demora para restabelecer o fornecimento de energia para os consumidores, e estão descritos a seguir (ANEEL, 2012):

- DEC: indica o número de horas em média que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, que geralmente é mensal;
- FEC: indica quantas vezes, em média, houve interrupção na unidade consumidora (residência, comércio, indústria, etc).
- DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora): indica por quanto tempo que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado;
- FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora): indica o número de vezes respectivamente que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado;
- DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora): é um indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo.

- TMA (Tempo Médio de Atendimento): é a razão entre o tempo total utilizado para o atendimento, a partir da solicitação de um cliente, e o total de chamadas atendidas.

Além da melhora desses indicadores, a rede inteligente pode proporcionar outros benefícios às concessionárias e aos consumidores. Esses benefícios encontram-se descritos a seguir (VICENTE, 2007).

Geração e transmissão:

- Melhoria no planejamento;
- Previsão e controle de carga;
- Gerenciamento de riscos;
- Melhoria da arbitragem.

Distribuição:

- Detecção de fraudes;
- Perfil da carga;
- Gerenciamento de rede;
- Geração distribuída;
- Detecção de falhas;
- Redução de serviços de manutenção.

Comercialização:

- Controle da inadimplência;
- Serviços de valores agregados;
- Redução da reclamação dos clientes;
- Redução do custo do medidor;
- Gerenciamento de energia;
- Novas tarifas;
- Redução do serviço de manutenção (VICENTE, 2007).

Hoje, caso sejam ultrapassados os valores dos indicadores, que são estabelecidos pela ANEEL, a concessionária paga uma compensação, que é uma

multa, para os clientes que foram afetados pelas interrupções. Em casos extremamente críticos, a empresa pode perder, inclusive, a concessão de fornecimento de energia elétrica (ANEEL, 2010).

As concessionárias estão investindo na automatização das suas redes de concessão. A CPFL tem um planejamento de automatizar toda a sua rede em dez anos, onde nos três primeiros anos serão automatizados os medidores dos clientes do tipo A (de grande porte, instalados em redes de alta e média tensão) e as chaves das redes primárias, e na sequência, serão automatizados os clientes de baixa tensão. A Eletrobrás investiu 700 milhões de reais em automação e processos industriais e comerciais. A Cemig está trabalhando num programa de automação da distribuição, chamado Cidade do Futuro, que será implantado em Sete Lagoas, que possui mais de 80 mil unidades consumidoras, onde o projeto vai reestruturar toda a rede, automatizando as redes, subestações e medições de consumidores, integrando os sistemas computacionais, adaptando o sistema de telecomunicações e geração distribuída e criando pontos de abastecimento para veículos híbridos e elétricos (CEMIG, 2011).

3.5. Algumas empresas que estão trabalhando com soluções para redes inteligentes no Brasil

Empresas de tecnologias, centros de pesquisa e empresas de consultoria no setor de energia estão com um empenho muito grande em projetos relacionados a *smart grid*. Mas é necessário ter muito cuidado na definição das soluções tecnológicas a serem desenvolvidas para a implementação das redes inteligentes, pois estão envolvidas políticas públicas, regulação e modelo de negócio no setor elétrico.

O CPqD é uma instituição independente, com foco na inovação em Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs). Nessa instituição, foi realizado, recentemente, um seminário internacional sobre *smart grid* (II Seminário Internacional de Smart Grid), em conjunto com a APTEL (Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de

Telecomunicações), UTC (Utilities Telecom Council) e do Comitê Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (Cigré-Brasil). O objetivo foi discutir o próprio conceito de *smart grid* e as estratégias de utilização dessa tecnologia a médio e longo prazo (PIMENTA, 2010).

A IBM trabalha em conjunto com o Global Intelligent Utility Network Coalition (GIUNC) para acelerar a adoção de tecnologias *smart grid* globalmente. A GIUNC foi criada pela IBM em 2007, e a entidade é dedicada a encontrar formas de desenvolver mercados, identificar redução de custos, buscar maior eficiência operacional e difundir conhecimento por meio de lições aprendidas e melhores práticas.

No Brasil, a IBM convidou a CPFL para participar do GIUNC, apoiando a empresa a ter acesso a tecnologias e projetos que estão sendo desenvolvidos para transformar a forma como a energia é gerada, transmitida, distribuída e consumida. As mudanças nesses processos visam agregar inteligência em toda a rede para reduzir, significativamente, interrupções e falhas, além de melhorar o atendimento, planejar a demanda atual e futura e aumentar a eficiência no consumo (IBM, 2011).

Com a parceria, a CPFL se junta a outras importantes companhias mundiais, como a DONG Energy da Dinamarca, a North Delhi Power Limited da Índia, a Country Energy da Austrália, a CenterPoint Energy, a Pepco Holdings, Inc, Progress Energy, a San Diego Gas & Electric e a Southern California Gas Co dos Estados Unidos. Entre as iniciativas já realizadas pelo grupo está a criação de um Modelo de Maturidade, ferramenta para o planejamento da transformação do *smart grid* que pode ser utilizada gratuitamente por qualquer empresa (IBM, 2010).

A General Electric (GE) aguarda regulamentação da ANEEL para dar início aos projetos piloto de aplicações em *smart grid* no Brasil. A GE implantou um projeto de *smart grid* em Miami, com investimento de US\$ 200 milhões. Em Londres, a implantação do projeto está em andamento e a expectativa da empresa é de que, até 2020, a tecnologia seja aplicada em toda cidade (ALCÂNTARA, 2010).

A empresa de tecnologia americana Silver Spring Networks anunciou uma parceria com a empresa de solução de redes elétricas Axxiom, controlada pela estatal elétrica de Minas Gerais (CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais) para digitalizar o parque de relógios e medidores de eletricidade. Enquanto a empresa americana fornece novos medidores, a Axxiom ajudará a desenvolver um sistema para integrá-los e permitir controle e monitoramento à distância, inclusive pela Internet. Está ocorrendo uma troca de informações da ANEEL, sobre os medidores, que ainda não foram validados para as instalações nas unidades consumidoras (DALLA, 2010).

A Treetech Sistemas Digitais, especializada no monitoramento online de subestações, lançou uma nova família de sensores inteligentes para detecção de falhas em equipamentos, como transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras e reguladores de tensão. A companhia também trouxe ao mercado uma versão aprimorada do *software* modular Sigma, utilizado no gerenciamento das informações captadas e na realização dos respectivos diagnósticos. Outra novidade da Treetech é a prestação de serviços de consultoria para análise, gestão dos dados e propostas de soluções para eventuais falhas. De acordo com a companhia, a gestão de ativos da Treetech é compatível com o conceito de *smart grid* e baseada na manutenção preditiva, que prevê a detecção de falhas em estágios iniciais, reduzindo o número de interrupções no fornecimento de energia. Os sensores inteligentes, o *software* e a consultoria formam, em conjunto, uma solução para gestão de subestações de concessionárias e indústrias eletrointensivas. Denominada SmartAsset Management, a ferramenta é voltada às áreas de engenharia de manutenção, operação, planejamento e construção de concessionárias e indústrias eletrointensivas. A solução oferece, entre outras funcionalidades, o monitoramento online dos transformadores, disjuntores e seccionadoras recomendações de manutenção, operação e planejamento e relatórios de desempenho e do estado dos ativos.

A Elipse fornece soluções de *software* com foco na área de geração e distribuição, mas também atua na área de telemedicação e pretende utilizar plataformas para atuar nos *smart grids*. A empresa pretende manter os produtos atuais, o ElipseSCADA (Supervisory, Control and Data Acquisition System), que é

uma ferramenta de aquisição e supervisão de sistemas focado para empresas de pequeno e médio portes, e o E3, que é voltado para aplicações industriais e de energia e possibilita a rápida construção de aplicações de supervisão e controle de subestações pela comunicação direta com relés e proteção de diversos fabricantes. Foi feita uma modelagem elétrica do E3, o E3 Power, que servirá de base para empresas atuarem nos *smart grids*. O foco principal é a cooperação com o sistema GIS (“*Geographic Information System*”), que é um sistema georeferenciado utilizado por um grande número de concessionárias.

Além das empresas citadas, muitas outras também estão em contato com concessionárias de energia elétrica brasileiras, disputando entre si um acordo para trabalhar em conjunto com as concessionárias, oferecendo suas soluções para a implantação do *smart grid* no Brasil (SMARTGRID NEWS, 2012) (SILVERSPRING NETWORKS, 2012) (ITRÓN, 2012).

3.6. Telecomunicações em redes inteligentes

Conforme citado anteriormente, o conceito de *smart grid* envolve a transmissão de dados para monitoramento e controle da rede elétrica. Esses dados consistem em (LIMA e JANNUZZI, 2012):

- Informações da quantidade de energia elétrica consumida pelos clientes;
- Desligamento ou restabelecimento remoto de ligação de clientes por falta de pagamento;
- Informação de ponto de perda técnica ou não técnica em pontos na rede;
- Manobras telecomandadas de dispositivos na rede, por conta de manutenção programada ou corretiva;
- Informação de carregamento de transformadores e alimentadores na rede.

Essa comunicação entre a concessionária (central) e dispositivos instalados na rede pode ser feita através de vários tipos de tecnologia, dentre elas (LOPES, FRANCO, *et al.*, 2012):

- Fibra óptica;
- Internet;
- PLC;
- ZigBee;
- *Bluetooth*;
- Wi-Fi;
- Wi-Max;
- GPRS.

3.6.1. Fibra óptica

A fibra óptica é formada por um núcleo fabricado de material dielétrico (sílica ou plástico), envolta por uma camada chamada de casca que também é fabricada com material dielétrico, possuindo ainda um revestimento que possui a finalidade de proteção contra choques mecânicos e excesso de curvatura, conforme Figura 33 (JUNIO, 2012). A casca possui um índice de refração menor que o núcleo da fibra.

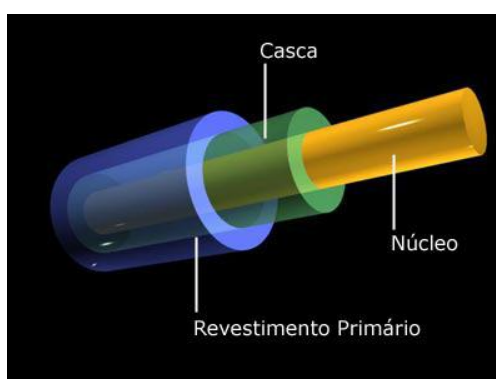


Figura 33. Fibra óptica e sua composição (JUNIO, 2012)

Nas fibras mais comuns, seu núcleo pode ter diâmetro de 125 micrômetros e nas fibras mais sofisticadas esse diâmetro é menor.

O princípio de comunicação de dados na fibra é baseado no fenômeno da refração da luz, pois é exatamente este fenômeno que ocorre no interior da fibra óptica. A luz percorre a extensão da fibra do início ao fim, refletindo várias vezes nas paredes da interface núcleo/casca, conforme pode ser visualizado na Figura 34.

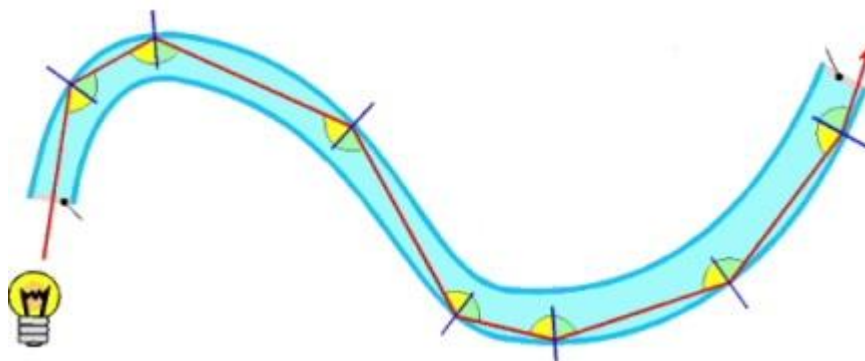


Figura 34. Refração da luz dentro da fibra óptica (TOFFONI, 2009)

Existem dois tipos de cabos: as fibras monomodo e multimodo. A diferença entre esses dois modos é que as fibras monomodo possuem características para transmissão de dados a grandes distâncias. Entretanto seu manuseio é difícil, exige muita técnica e seu custo é mais elevado. As fibras multimodo possuem diâmetro maior sendo possível transmitir mais de um sinal na mesma fibra. Existem pesquisadores que conseguiram transferência de dados na ordem de 100 Tbps na fibra óptica (JUNIO, 2012).

Como todo meio de transmissão, existem vantagens e desvantagens na sua utilização

Vantagens:

- Possuem tamanho reduzido;
- Suportam grande quantidade de dados de transmissão;
- Possuem atenuação muito baixa;
- São imunes a interferências eletromagnéticas;
- Sua matéria-prima é abundante.

Desvantagens:

- Seu custo é elevado;
- Possuem fragilidade nas fibras ópticas sem encapsulamento;
- Possuem dificuldade de conexões das fibras ópticas;
- Acopladores tipo T possuem perdas muito grandes.

3.6.2. Internet

A Internet teve origem na década de 60, durante a guerra fria, e foi desenvolvida pelo Departamento de Defesa Americano e a Agência de Desenvolvimento de Projetos Avançados (ARPA). Nesta época, a intenção era ter uma rede que fosse imune à sabotagem durante o processo de transmissão de informações (FAGUNDES, 2010). Qualquer pessoa física ou jurídica pode participar da Internet, que é uma rede de computadores de acesso público e ilimitada, utilizando uma infraestrutura homogênea de telecomunicações (FAGUNDES, 2010).

A configuração básica da rede Internet é composta interligando vários pontos de acessos, sendo que em caso de perda de uma interligação de um ponto a outro, a troca de informações é realizada utilizando um outro caminho. A Figura 35 apresenta um exemplo desta rede.

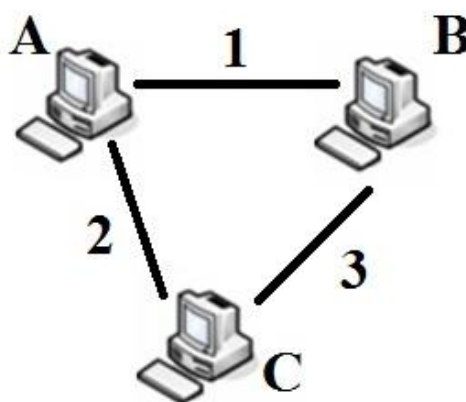


Figura 35. Rede de computadores.

Na Figura 35 tem-se um exemplo de uma rede de computadores, princípio da Internet, na qual o usuário A comunica-se com o usuário B através do canal 1. Entretanto, se por algum motivo, o canal 1 estiver fora de operação, é possível ao usuário A comunicar-se com o usuário B utilizando o canal 2-3. Para os usuários A e B o canal utilizado para a troca de informações é indiferente, pois o importante entre estes dois usuários é que a troca de informações seja realizada, seja pelo canal 1 ou pelo canal 2-3.

A comunicação de dados entre os usuários da rede Internet é realizada utilizando o protocolo TCP/IP (*“Transmission Control Protocol/Internet Protocol”*), utilizando a comutação de pacotes. O protocolo TCP é responsável por dividir a informação (dados a serem enviados) em pacotes pequenos de tamanhos pré-definidos, receber e enviar estes pacotes, verificar se os pacotes contêm erros e reagrupar os pacotes (no recebimento) na sua forma original. Enquanto que o protocolo IP cuida do endereço, envelopamento e envio dos dados empacotados (HTML4BLOG, 2010).

Atualmente, a Internet é o maior banco de dados do mundo, além de ser o meio mais rápido e barato para transmitir dados (AZEVEDO, 2010).

3.6.3. PLC

PLC ou BPL são tecnologias onde os sinais de telecomunicação utilizam o mesmo meio físico que a energia elétrica para se propagar, sem que um cause nenhum tipo de interferência no outro. Isso porque estes sinais operam em frequências diferentes, sendo de 50 e 60 Hz para a energia elétrica e de 1,7 a 30 MHz para a conexão PLC.

O PLC pode servir de acesso para Internet para unidades consumidoras, apresentando uma grande vantagem, pois a rede elétrica está presente em 95% das residências do Brasil, ou seja, não é preciso passar nenhum tipo de cabeamento para que a Internet esteja conectada à casa do usuário. Entretanto, é necessário instalar um modem PLC, que é mostrado na Figura 36. Conhecido como Master, esse modem é instalado na rede elétrica secundária de baixa

tensão, nos transformadores em postes que estão distribuídos na rede, responsáveis, em média, pelo fornecimento de energia a 50 residências.



Figura 36 – Modem PLC (KARASINSKI, 2010)

Usando tecnologia *smart grid*, é possível administrar equipamentos na própria rede de distribuição, usando sensores inteligentes, simplificando sua manutenção e o controle de perdas. Outra possibilidade é promover uma melhor gestão da demanda do consumidor via o uso de tarifas variáveis de acordo com a demanda global no sistema, que pode incentivar o consumidor a reduzir o consumo nas horas de maior demanda, e conseqüentemente o preço, assim reduzindo a necessidade de novos e caros investimentos em geração e fazendo um uso mais econômico da capacidade de geração existente. Isto se torna possível via medidores eletrônicos que podem se comunicar nos dois sentidos, geralmente fazendo uso da própria rede elétrica.

A normativa referente à utilização da rede elétrica para a transmissão de dados e acesso a Internet em alta velocidade por meio da tecnologia PLC foi aprovada em agosto de 2009 (TELECO, 2012). Para a utilização de comunicação da rede primária para a rede secundária, que seria a interligação da alta tensão (normalmente 13,8 kV) com a baixa tensão (normalmente 220 V), através da rede inteligente, seria necessário confeccionar *links* ópticos em cada transformador, pois o mesmo não possui contato físico nos cabos de um lado para o outro da queda de tensão do transformador. Nesses *links* ópticos seria necessário pegar o sinal na rede com um modem PLC, filtrar a frequência destinada à comunicação, converter esse sinal elétrico em óptico, passar esse sinal por uma fibra, desviando do transformador, e em seguida converter o sinal de óptico para elétrico novamente e com um modem PLC, lançar o sinal na rede novamente, para que possa continuar trafegando no restante da rede. Uma melhora na eficiência desse

processo pode gerar uma procura desse recurso pelos consumidores, o que seria mais um serviço prestado pelas concessionárias, ou mesmo uma fonte de renda obtida pelas empresas que fornecem serviços de Internet, por utilizarem a estrutura da rede que já está instalada e correspondem a ativos de propriedade das concessionárias.

Um problema que pode interferir na qualidade da comunicação na rede é a qualidade da energia transmitida, com a presença de ruídos, o que pode comprometer os sinais transmitidos. Esse problema pode ser minimizado com a instalação de filtros e amplificadores na rede. Esses ruídos podem ser de origem da própria rede, como conectores defeituosos ou emendas mal feitas, ou de clientes com emissão de harmônicas na rede por excesso de motores ou máquinas de solda e instalações mal projetadas, por exemplo.

A COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica) tem o objetivo de descobrir soluções para que a Power Line Communication se torne uma opção viável de conexão quando comparada às redes disponíveis atualmente, seja através de linha telefônica, cabo ou Wi-Fi (BAIXAKI, 2010). O atual enfoque da pesquisa é buscar soluções para os problemas que surgem e formas de facilitar o percurso do sinal, tornando a instalação tão fácil quanto a de uma linha telefônica ou ponto de TV a cabo. A primeira etapa foi um teste com 90 domicílios voluntários; a segunda etapa consiste em expandir para 10 mil residências com consumidores reais, atendendo suas exigências e, a partir da terceira etapa, já entrariam consumidores comerciais, mas isso dependeria dos resultados obtidos nas etapas anteriores (KNIGHT, 2009).

3.6.4. ZigBee

A ZigBee Alliance, que desenvolve o padrão ZigBee junto ao Institute of Electrical and Eletronics Engineers (IEEE), compõe uma rede de sensores em que a tecnologia é de baixo consumo e limitada. Contudo, o que parece uma desvantagem a princípio, pode encontrar aplicação em várias áreas, uma vez que consiste em uma rede capaz de concentrar informação e realizar, por exemplo,

medições remotas numa situação de *smart grid* com mobilidade (SMARTGRID NEWS, 2011).

Os dispositivos baseados na tecnologia ZigBee operam na faixa ISM (“*Industrial Medical Scientific*”) que não requer licença para funcionamento, incluindo as faixas de 2,4 GHz (Global), 915 Mhz (América) e 868 Mhz (Europa) e com taxas de transferência de dados de 250 kbps em 2,4 GHz, 40 kbps em 915 Mhz e 20 kbps em 868 Mhz. O padrão oferece, atualmente, interfaces com velocidades de conexão compreendidas entre 10 kbps e 115 kbps e com um alcance de transmissão entre 10 m e 100 m, dependendo diretamente da potência dos equipamentos e de características ambientais (obstáculos físicos, interferência eletromagnética, etc).

Quanto ao problema de alimentação dos dispositivos, os módulos de controle dotados com esta nova tecnologia podem ser alimentados até mesmo por baterias (pilhas) comuns, sendo que sua vida útil está relacionada diretamente com a capacidade da bateria e a aplicação a que se destina. Nesse aspecto, o protocolo ZigBee foi projetado para suportar aplicações com o mínimo de consumo.

A aplicação do ZigBee numa rede inteligente seria na comunicação entre dispositivos, numa distância não muito grande, por conta das limitações dos transmissores, até conseguir acesso na WAN (“*Wide Area Network*”), para que a central da concessionária consiga estabelecer a comunicação (MAURÍCIO, 2010). A Figura 37 destaca o ZigBee na rede inteligente e ilustra como funciona a comunicação.

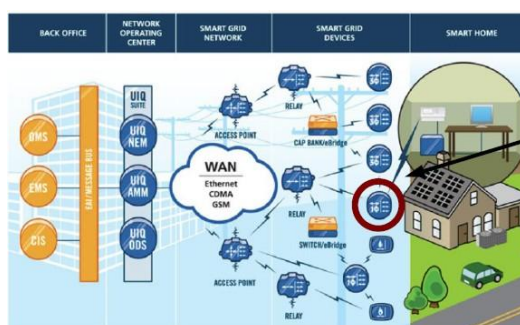


Figura 37– Rede inteligente utilizando ZigBee (LIN, 2009)

3.6.4.1. Protocolo 802.15.4

O protocolo 802.15.4 é um protocolo desenvolvido pelo IEEE e refere-se à comunicação sem fio. O objetivo geral deste padrão era de se ter uma padronização para uma tecnologia que apresentasse baixa transmissão de dados, entretanto possuindo fácil comunicação e baixo consumo de energia elétrica.

A Tabela 1 apresenta um comparativo de algumas tecnologias de transmissão sem fio.

Tabela 1. Tecnologias de transmissão sem fio

Tecnologia	ZigBee e 802.15.4	GSM/GPRS CDMA	802.11	Bluetooth
Aplicação principal	Monitorização de processos e controle	Transmissão de dados e voz em grandes áreas	Internet de alta velocidade	Conectividade entre dispositivos
Autonomia	Anos	1 semana	1 semana	Semanas
Largura de Banda	250 kbps	Até 128 kbps	11 Mbps	720 kbps
Alcance típico	Mais de 100 metros	Alguns km	De 50 a 100 metros	De 10 a 100 metros
Vantagens	Baixo consumo de energia e custo reduzido	Infraestruturas já existentes	Altas velocidades	Versatilidade na ligação entre dispositivos

Fonte: (KOCHHANN, 2009)

O protocolo IEEE 802.15.4 estabelece a camada física e a camada de controle de acesso ao meio, enquanto que o protocolo ZigBee estabelece a camada de rede e o *framework* para a camada de aplicação (MUÑOZ, 2009), tendo assim a capacidade de estabelecer redes e realizar roteamento (MONTEIRO, 2009).

Nas frequências de 868 MHz e 915 MHz, utiliza-se a modulação BPSK (*“Binary Phase Shift Keying”*) enquanto que a frequência 2,4 GHz é usada a modulação O-QPSK (*“Offset Quadrature Phase Shift Keying”*). Ambas as modulações encontram-se descritas em anexo (Anexos A e B). Nesta padronização, ainda são apresentadas outras características como:

- Endereçamento pode ser de 16 bits ou 64 bits;

- Garantia de confiabilidade na transmissão da mensagem;
- Baixa latência;
- As redes podem ser em modo estrela, árvore ou malha.

Os sensores em uma rede ZigBee são classificados em:

- Dispositivo de função completa (FFD – “*Full Function Device*”) podendo ter função de coordenador (*coordinator*) ou roteador (*router*), é este dispositivo que é responsável por iniciar uma rede.
 - Coordenador: Existe apenas um coordenador em cada rede, este tipo de sensor possui maiores funções agregadas, por isto normalmente não são ligados a baterias ou suas baterias necessitam de manutenção constante. Este tipo de sensor é capaz de criar uma rede, sendo o único elemento da rede com autonomia de comutar dados entre redes (DESMONTA&CIA, 2010). Portanto, é este dispositivo que possui a função de ajuste de parâmetros, gerência dos nós e distribuição de mensagens pela rede. Opera tipicamente no estado ativo.
 - Roteador: este tipo de sensor tem a função de fornecer informações a outros dispositivos da rede (DESMONTA&CIA, 2010), é por meio deste roteador que a rede ZigBee pode ser expandida e obter maior alcance (MUÑOZ, 2009).
- Dispositivo de função reduzida (RFD – “*Reduced Function Device*”) é o dispositivo final (*endpoint*) que possui a finalidade de trocar informações com o coordenador ou roteador; por isto, utiliza pouca memória, fazendo, assim, economia de energia e custando menos (DESMONTA&CIA, 2010). Portanto, este dispositivo pode permanecer em estado “*sleep*” por um grande período.

As redes utilizando o protocolo ZigBee foram desenvolvidas pensando em topologia de redes malha, entretanto é possível utilizar as topologias estrela e árvore. Em qualquer destas redes é possível obter até 65.535 dispositivos para

cada dispositivo coordenador (MONTEIRO, 2009). Os diferentes tipos de topologia para as redes ZigBee encontram-se detalhadas no Anexo C.

O protocolo ZigBee que incorpora o protocolo 802.15.4 possui a finalidade de apresentar baixo consumo de energia, apresentando assim grande eficiência energética. Estes dispositivos apresentam dois possíveis estados: “*active*” e “*sleep*”. O primeiro é utilizado na transmissão e recepção, enquanto que o segundo é utilizado quando não está executando nenhuma tarefa. O protocolo 802.15.4 permite uma grande quantidade de dispositivos por rede (65.535 nós por coordenador em uma rede), utilizando um protocolo simples, entretanto robusto que permite confiança na transferência de dados.

3.6.5. Bluetooth

Bluetooth é um protocolo padrão de comunicação primariamente projetado para baixo consumo de energia com baixo alcance, baseado em microchips transmissores de baixo custo em cada dispositivo. O *Bluetooth* possibilita a comunicação desses dispositivos uns com os outros quando estão dentro do raio de alcance. Os dispositivos usam um sistema de comunicação via rádio, por isso não necessitam estar na linha de visão um do outro, e podem estar até em outros ambientes, contanto que a transmissão recebida seja suficientemente potente (BRITO, 2003).

Existe um exemplo da utilização da comunicação por *Bluetooth* no setor energético em São Paulo, feito pela concessionária AES Eletropaulo (REDE INTELIGENTE, 2011). A tecnologia foi a solução para o problema que os agentes da concessionária possuíam em contabilizar a quantidade de energia consumida durante o mês por restaurantes e lojas que se encontravam fechados. Nesse caso, o cliente (loja ou restaurante) possui um medidor eletrônico, onde é instalado um transmissor *Bluetooth*, sendo que o coletor de dados do agente tem um receptor. Com a comunicação do transmissor e receptor é possível coletar as informações de consumo do cliente. A senha do *Bluetooth* é o número do medidor que está instalado, então, quando o agente está fazendo a leitura do *Bluetooth* ele está indicando qual é o número do medidor em que está sendo feita a leitura,

fazendo a distinção dos medidores que estão sendo enxergados pelo coletor de dados.

Por enquanto, cerca de 300 comércios espalhados por toda capital paulista já estão testando a tecnologia. A fase de experiência terminou em junho de 2010 e a previsão é de que até 70 mil estabelecimentos comerciais da cidade recebam a nova aplicação (OLHAR DIGITAL, 2010). A medição residencial também deverá sofrer alterações. Ao invés de *Bluetooth*, a tecnologia usada será a de rádio frequência, que também permite a leitura do consumo, mesmo sem acesso visível ao contador. Mas a mudança acontecerá apenas em residências que apresentam dificuldade de leitura manual (OLHAR DIGITAL, 2010).

Os testes de laboratório já foram feitos, agora só falta concluir as adaptações do software de leitura do coletor de dados para comunicar com o receptor da rádio frequência (ALCÂNTARA, 2010). Essa tecnologia pode ser utilizada nas redes inteligentes, sendo bem parecida com o padrão do ZigBee, com uma taxa de transmissão maior, mas também possuindo limitações de alcance de comunicação.

3.6.6. Wi-Fi

O padrão Wi-Fi é baseado no padrão IEEE 802.11, e foi desenvolvido para funcionar em redes LAN ("*Local Area Network*"), tendo, portanto, curto alcance. Possui, basicamente, o mesmo funcionamento do ZigBee e do *Bluetooth*, mas possui algumas diferenças de potência de transmissão, onde o Wi-Fi trabalha com maior potência, possui *hardware* mais robusto e com maior consumo de energia. As faixas de frequência de operação do padrão Wi-Fi são 2,4 GHz e 5 GHz (na América do Norte). Na Figura 38 pode-se ver um gráfico com a comparação dos padrões de ZigBee, *Bluetooth* e Wi-Fi, onde pode-se notar que a distância não difere muito entre os 3 padrões, mas a taxa de transmissão tem uma diferença expressiva (ALCÂNTARA, 2010).

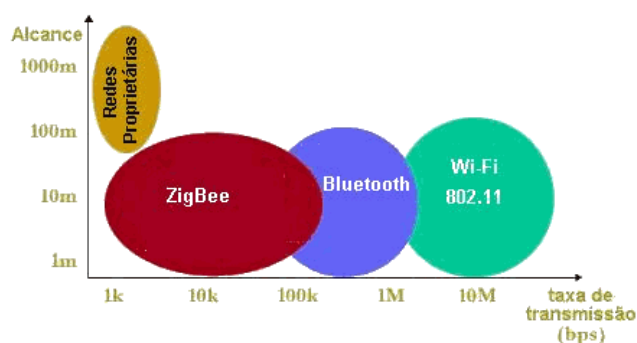


Figura 38. Gráfico comparando a taxa de transmissão das tecnologias ZigBee, *Bluetooth* e Wi-Fi (PINHEIRO, 2010)

O que seria diferente na aplicação de uma rede inteligente entre o padrão ZigBee e Wi-Fi é apenas a quantidade de dispositivos que dependeriam da transmissão de um ponto de transmissão, pois quanto maior o número de medidores, por exemplo, maior a quantidade de informação a ser transmitida.

3.6.7. Wi-Max

O Wi-Max trata de uma tecnologia de banda larga sem-fio, capaz de atuar como alternativa a tecnologias como cabo e DSL (*“Digital Subscriber Loop”* - Linha de assinante digital) na construção de redes comunitárias e provimento de acesso de última milha. Em teoria, espera-se que os equipamentos Wi-Max tenham alcance de até 50 km e capacidade de banda passante de até 70 Mbps. Na prática, alcance e banda dependerão do equipamento e da frequência usados, bem como da existência ou não de visada (BOAS, 2007).

A tecnologia foi desenvolvida por um *pool* de empresas, lideradas pela Intel e pela Nokia, com base no padrão IEEE 802.16. Além de operar em uma ampla faixa de frequência, de 2 a 66 GHz, as principais vantagens estão no tripé banda larga, longo alcance e dispensa de visada, o que não ocorre com outras tecnologias sem-fio. O Wi-Fi, por exemplo, foi desenvolvido para funcionar em redes LAN, tendo, portanto, curto alcance. Justamente o oposto do Wi-Max, que foi desenvolvido para funcionar em redes metropolitanas MAN (*“Metropolitan Area Network”*) (REDE NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA, 2010).

A aplicação do padrão Wi-Max para comunicação de dispositivos em redes inteligentes é a opção sem fio mais recomendada para redes de longa extensão com dispositivos mais distantes, no caso de redes primárias em áreas rurais, por exemplo. E outro ponto positivo é a opção de utilizar a comunicação com PDA's ("Personal Digital Assistant") que são utilizados pelos técnicos que atuam em campo, e em alguns casos trafegam em lugares que não possuem visadas, entre prédios, por exemplo.

3.6.8. GPRS

O GPRS é um serviço de valor agregado que permite o envio e recepção de informações através de uma rede telefônica móvel. É oferecido pelas empresas operadoras de celular. Possui taxas de transferência teóricas de até 171,2 kbps que, na prática, podem chegar até 40 kbps (DIGITAL SATÉLITES, 2012). O transporte de dados nesse serviço é feito por comutação de pacotes e sua tarifação é baseada no volume da informação trafegada. Facilita conexões instantâneas, pois a informação pode ser enviada ou recebida imediatamente conforme a necessidade do usuário e não há necessidade de conexões dial-up através de *modems*. Para usar GPRS, os usuários precisam especificamente de um telefone móvel ou terminal que suporte GPRS, ter assinatura em uma rede de telefonia móvel que suporte GPRS, ter o uso de GPRS habilitado, que pode ser com acesso automático ou uma opção específica de adesão, dependendo da operadora, ter conhecimento de como enviar e receber informações através do GPRS usando seu aparelho telefônico, incluindo configurações de *hardware* e *software*, e um destino para enviar ou um local de onde receber informações através do GPRS (CARVALHO, 2010) (DIAS, 2010). A Figura 39 ilustra um receptor de monitoramento via tecnologia GPRS.



Figura 39 – Receptor para monitoramento via GPRS (CAU30 ELETRÔNICOS, 2010)

Existem medidores com comunicação baseada em GPRS, o que não parece ser tão vantajoso, pois em relação à aplicação, não é necessário que cada residência fique enviando informação, onde o valor cobrado pela operadora aumenta proporcionalmente com o aumento de volume de informação transmitida, além de subutilizar a capacidade da transmissão. A aplicação mais viável da comunicação via GPRS é a transmissão de todas as unidades consumidoras que são alimentadas pelo mesmo transformador, pois utiliza uma taxa maior de transmissão, aproveitando mais a capacidade do transmissor, e são menos pontos vinculados com a operadora que presta o serviço de comunicação GPRS.

O GPRS pode ser utilizado juntamente com outras formas de transmissão. Um exemplo disso é no caso de existirem várias unidades consumidoras sendo alimentadas por um transformador e, junto com o transformador, existir instalado um terminal com suporte GPRS, onde são transmitidos os dados dos consumidores alimentados por esse transformador e recebem os dados de comandos do centro de operação para manipulação dos dispositivos no trecho da rede que está ligado a esse transformador. A transmissão de informação dos medidores dos consumidores e do terminal que recebe e envia as informações é feita via PLC, ou também poderia ser feita através via ZigBee. Sendo assim, uma alternativa para a solução de aplicações que utilizam a tecnologia PLC, sendo que o GPRS poderia funcionar como o *link* de comunicação entre a baixa tensão e alta tensão de um transformador, no qual não existe conexão física. (JACKSON, 2010).

Um caso onde é bem aplicável o uso do GPRS é no monitoramento em tempo real da geração eólica, onde é possível evitar danos a equipamentos que são muito caros. A Figura 40 ilustra um monitoramento via GRPS de uma geração eólica.

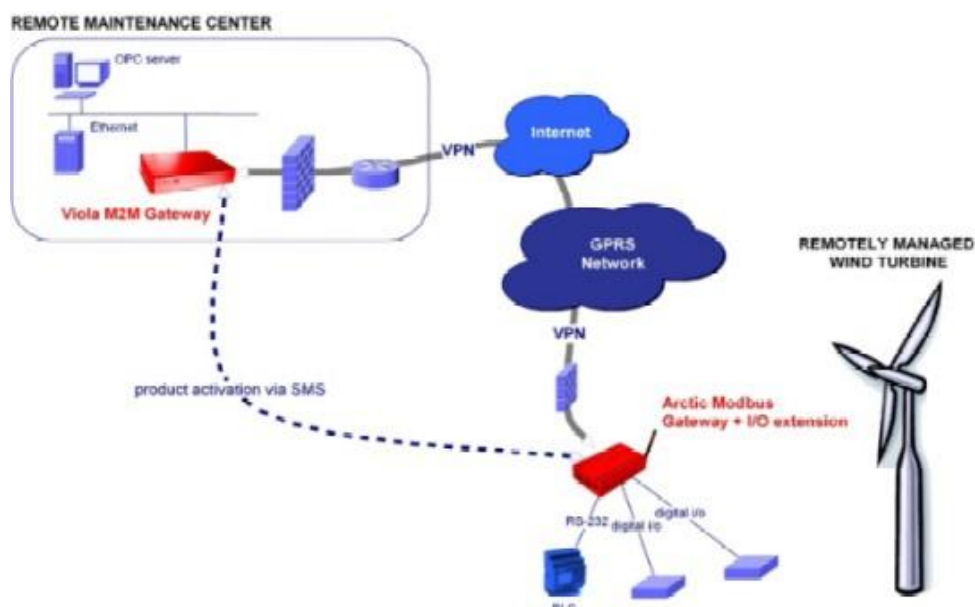


Figura 40 – Monitoramento via GPRS de uma geração eólica (SMART GRID – DIRECT COMMUNICATION FOR ENERGY NETWORKS, 2010)

As empresas e instituições que estudam soluções em tecnologias para o setor energético estão na busca pela melhor forma de comunicação que atenda as necessidades do *smart grid*, e como existe uma disputa para quem chega com a melhor solução, estão querendo agilizar a chegada do 4G no Brasil (PAULA, 2010). O 4G é a quarta geração na escala da evolução do celular. O interesse de antecipar sua chegada ao Brasil é a implantação do conceito de *smart grid* nas redes elétricas com um sistema de comunicação com recursos para suportar todos os quesitos que a tecnologia da rede necessitar, em questão de tipo de operação e desempenho.

4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADOS À SIMULAÇÃO

4.1. Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é composto por diversos métodos numéricos que permitem solucionar, de forma aproximada, um problema descrito por equações diferenciais ordinárias ou parciais, como as equações de Poisson e de Laplace (MARZO, 2010) (CAIRES, 2009). Este método utiliza a subdivisão da geometria em estudo em várias dimensões menores, chamadas de elementos finitos (CAIRES, 2009). O MEF é utilizado, atualmente, em diversas áreas da ciência e da indústria, como por exemplo (SOUZA, 2003) (MARZO, 2010):

- Análise de tensões e deformações;
- Transferência de calor;
- Elastostática;
- Elastodinâmica;
- Eletroestática;
- Acústica;
- Fadiga;
- Mecânica da fratura;
- Mecânica dos fluidos;
- Reologia;
- Hidráulica;
- Biomecânica;
- Eletromagnetismo;
- Indústria automobilística;
- Indústria naval;
- Indústria aeronáutica;
- Indústria aeroespacial;
- Metalurgia;
- Mineração;

- Exploração de petróleo;
- Setor energético;
- Telecomunicações;
- Forças armadas;
- Meio ambiente;
- Recursos hídricos;
- Saúde;

A grande quantidade de áreas de aplicação deste método pode ser verificada de acordo com as inúmeras publicações existentes (LOTTI, 2003) (MC GUINNESS, 1992) (MIDDLETON, JONES e WILSON, 1990) (PROVATIDIS, 2000) (SAMESHIMA e MELNICK, 1994) (TANNE, BURSTONE e SAKUDA, 1989) (TANNE, MATSUBARA e SAKUDA, 1993) (TANNE e SAKUDA, 1979).

O MEF teve origem na época da 2ª guerra mundial, tendo sido elaborado pelo matemático Courant que publicou, em 1943, um artigo referente a este tema. Entretanto, como o método estava associado a uma formulação matemática complexa, não despertou grande interesse da comunidade científica, uma vez que os computadores disponíveis não possuíam poder de processamento suficiente para viabilizar a aplicação do método.

Contudo, na década de 50, com a necessidade de estudos para o desenvolvimento do jato Boeing, este método começou a ser utilizado na área aeronáutica. Com isto, em 1956, M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin e L. J. Topp escreveram um artigo no qual eram apresentadas as principais idéias do MEF, sua formulação e a montagem da matriz destes elementos (CAIRES, 2009).

Nos anos seguintes, ocorreu a reestruturação das universidades e institutos de pesquisas americano. Esta reestruturação foi decorrente da guerra fria e este método passou a ser utilizado em diversas áreas como pesquisa nuclear, indústria automotiva e aeroespacial (SOUZA, 2003) (MARZO, 2010). Em 1965, a NASA (*“National Aeronautics and Space Administration”* – Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço) desenvolveu um programa de uso geral utilizando MEF, que tinha o nome de NASTRAN. Em 1969, nasceu o programa ANSYS que é mundialmente conhecido (CAIRES, 2009).

A complexidade matemática associada ao MEF decorre do processo de geração de malha e, por este motivo, sua difusão começou a partir da popularização dos computadores (capazes de gerar e solucionar essa malha) (MARZO, 2010) nas décadas de 80 e 90, quando o MEF começou a se tornar popular e vastamente estudado e utilizado.

No Brasil, existem vários grupos de pesquisas utilizando o MEF e, dentre eles, destacam-se o GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos) da Universidade Federal de Santa Catarina, o grupo de pesquisas da Universidade Federal de Minas Gerais e a equipe de simulação de Fenômenos Eletromagnéticos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Existem muitos *softwares* comerciais que empregam o MEF tais como: ANSYS, NASTRAN/PATRAN, ADAMS, ABAQUS, etc (SILVA, 2009).

A ideia básica do MEF é dividir o domínio do problema em questão, que a princípio possui uma função contínua, em várias subdivisões, contendo superfícies com geometria simples, como por exemplo, triângulos, gerando elementos finitos triangulares. Com isto, é possível resolver um problema considerado complexo, dividindo-o em diversos problemas com resoluções simples (SOUZA, 2003). Outros tipos de formatos possíveis para os elementos finitos são quadrilateral, tetraédrico, hexaédrico e cúbico. Estes formatos de elementos dependem do tipo de dimensão do problema (unidimensional, bidimensional, tridimensional) e também da precisão necessária para o problema em questão.

Como exemplo, apresenta-se a equação (26) que corresponde à integral de volume de uma determinada função f .

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (26)$$

Onde:

\int_V é a integral de volume;

V é a área a ser integrada;

$\sum_{i=1}^n$ somatória de 1 até n (que é o número de elementos finitos).

Pressupondo que:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (27)$$

Onde:

V é o volume;

V_i é o volume de uma determinada área;

$\sum_{i=1}^n$ é a somatória de 1 até n .

Se todas as integrais pertencentes aos sub domínio de V_i forem calculadas, será obtida a segunda parte que representa ao volume total de V , sendo assim, cada sub domínio V_i corresponde a um elemento finito, possuindo uma geometria pré-determinada, enquanto que o somatório aproximará a resolução do problema de uma geometria complexa (AZEVEDO, 2003).

A Figura 41, apresenta uma superfície que foi dividida em várias geometrias de forma mais simples.

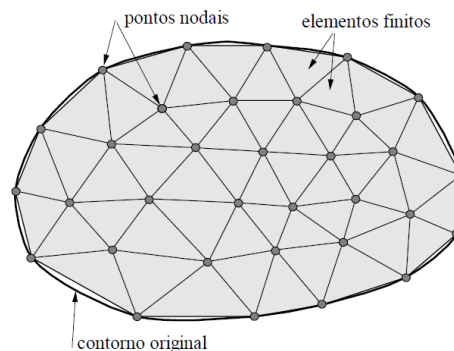


Figura 41. Malha de elementos finitos de uma superfície qualquer (SOUZA, 2003)

Na Figura 41 é possível observar que a superfície sob estudo possui uma delimitação de contorno original. Este contorno original possui uma região de difícil resolução, enquanto que os triângulos, chamados de elementos finitos, possuem formato geométrico de resolução mais fácil. O nome de elemento finito vem do fato da superfície do elemento apresentar dimensões finitas, contrastando, assim, com os elementos infinitesimais utilizados no cálculo diferencial e integral (SOUZA, 2003). Os pontos que conectam um elemento finito a outro são chamados de pontos nodais ou simplesmente nós, sendo que o conjunto formado pelos nós e elementos finitos é chamado de malha de elementos finitos (SOUZA, 2003).

A quantidade de elementos finitos dentro de uma malha define a precisão do resultado obtido para o problema. Se um número infinito de nós for utilizado, o erro para a resolução deste problema tende a zero. Com isto, quanto menor o tamanho do elemento finito, e automaticamente maior o seu número, maior será a precisão do resultado obtido para o problema em questão (SOUZA, 2003). Entretanto, quanto maior o número de elementos, maior o tempo de resolução do problema, podendo tornar a resolução do problema impraticável sem a utilização de computadores com *softwares* destinados a este fim. A Figura 42 apresenta o gráfico de um problema unidimensional, onde é possível verificar que quanto maior o número de elementos maior a precisão do resultado.

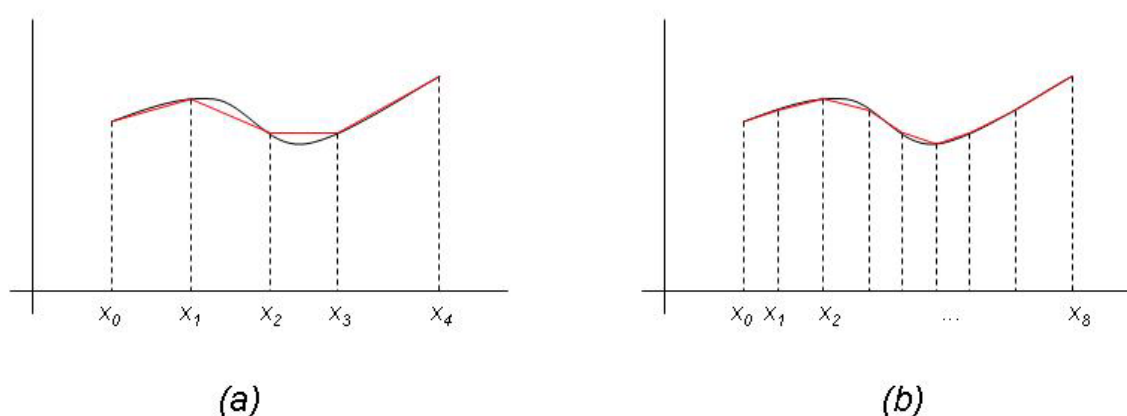


Figura 42. Aproximação de uma função qualquer com 5 e 9 elementos (GIANCCHINI, 2012)

Na Figura 42, pode-se observar que a curva em azul é a função original enquanto que a curva em vermelho é a função aproximada obtida. Na curva “a”, onde se tem 5 pontos (elementos), é possível visualizar que a curva aproximada está longe da curva azul. Na curva “b”, onde se tem 9 elementos, nota-se que a curva aproximada está menos distante da curva azul, quando comparada com a curva “a”. Pode-se visualizar, então, que quanto maior o número de elementos, maior será a precisão obtida.

4.2. Etapas para solução de problemas utilizando o MEF

O MEF pode ser dividido em várias etapas de resolução. Em alguns problemas, estas etapas podem estar misturadas ou serem trabalhadas de forma simultânea (SILVA, 2009). São elas:

- Desenvolvimento das equações do elemento;
- Discretização do domínio (1D, 2D, 3D), conforme geometria da superfície;
- Montagem das equações do elemento;
- Imposição das condições de contorno;
- Solução para os nós desconhecidos;
- Resolução e grandeza em cada elemento (SILVA, 2009).

4.2.1. Geração de malhas

As malhas podem ser geradas de forma estruturada ou não estruturada. A diferença entre elas é a representação da discretização espacial da malha. Enquanto a malha estruturada possui representação mais simples e, conseqüentemente, é mais fácil de programar, a malha não estruturada possui robustez quando trabalha-se com geometrias mais complexas. As Figura 43 e Figura 44 apresentam estes dois tipos de malhas.

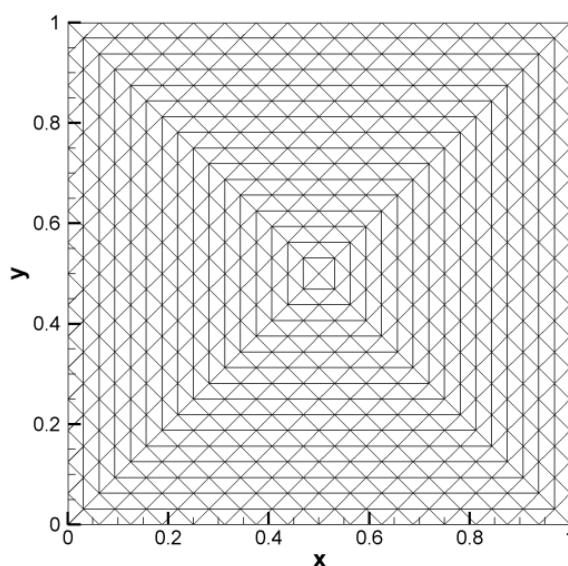


Figura 43. Exemplo de malha estruturada (AVILA, 2010)

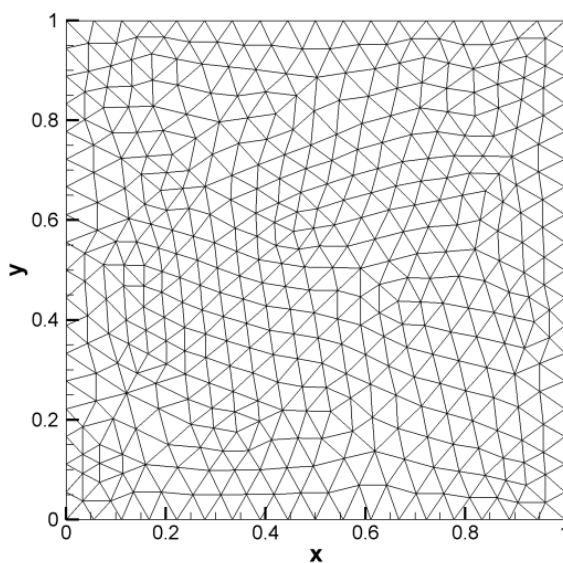


Figura 44. Exemplo de malha não estruturada (AVILA, 2010)

Nas Figura 43 e Figura 44, pode-se visualizar dois tipos de malhas que foram geradas automaticamente pelo *software* Gmsh (GEUZAINÉ e REMADE, 2012). Na malha estruturada, foram obtidos 1024 elementos e 545 nós, sendo 481 incógnitas, enquanto que na malha não estruturada estes números foram de 824 elementos, 449 nós com 377 incógnitas. O tempo de processamento da CPU, conforme (AVILA, 2010), foi de 22 segundos, para a malha estruturada e de 14 segundos para a malha não estruturada, enquanto que os resultados obtidos foram praticamente iguais.

4.2.2. Forma “Forte”

A forma “forte” consiste na resolução do problema, utilizando diretamente as equações que representam o problema físico em questão e suas condições de contorno (CAIRES, 2009). Este tipo de resolução requer uma continuidade nas soluções de variáveis que dependem do potencial elétrico. Estas funções devem ser diferenciáveis até a ordem da equação diferencial que soluciona o problema. Portanto, a solução de problemas utilizando este tipo de resolução exata é difícil e limitada a problemas especiais (CAIRES, 2009).

4.2.3. Forma “Fraca”

A forma “fraca”, por sua vez, é um aperfeiçoamento dos métodos numéricos aproximados que são representações integrais das equações diferenciais que governam o problema físico (CAIRES, 2009). Com isto, este método permite a utilização de um único método para solucionar diversos tipos de problemas físicos (CAIRES, 2009).

4.3. Exemplo de solução utilizando o MEF

A seguir, descreve-se, a título de ilustração, um exemplo utilizando o MEF para sua solução, extraído da referência (AVILA, 2010). Na Figura 45 é mostrada uma malha de elementos finitos de uma determinada superfície Ω .

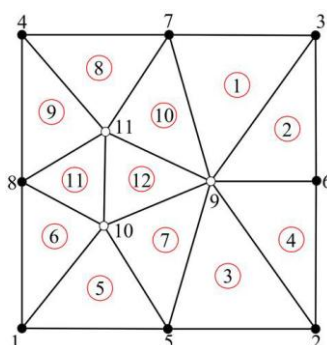


Figura 45. Malha de elementos finitos para uma superfície Ω (RIBEIRO, 2007)

Na Figura 45, pode-se observar uma superfície (Ω) que foi subdividida em 12 elementos finitos. Nota-se que existem também 11 nós, dos quais 8 são nós de contorno (nós de 1 a 8) e 3 são nós incógnitas (nós 9, 10 e 11). Tomando-se como exemplo o elemento número 1, tem-se o triângulo apresentado na Figura 46.

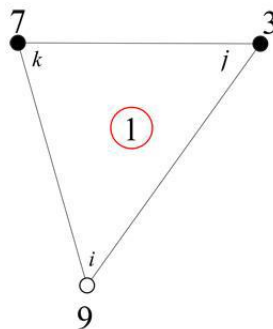


Figura 46. Elemento finito número 1 (RIBEIRO, 2007)

Na Figura 46, o triângulo é formado pelos vértices “i”, “j” e “k”, sendo que os vértices “k” e “j” representam os nós de contorno e o vértice “i” o nó de incógnita. Neste exemplo, os valores para a montagem da matriz elementar, que corresponde a forças nodais, e o vetor derivada elementar, que está relacionado com a determinação de momentos ao longo da superfície, equivalem a: “i”=9, “j”=3, “k”=7. Em *softwares* estes valores são obtidos através da geração de malha, de acordo com as seguintes equações:

$$m^{(1)} = (m_{ij}^{(1)})_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} m_{99}^{(1)} & m_{93}^{(1)} & m_{97}^{(1)} \\ m_{39}^{(1)} & m_{33}^{(1)} & m_{37}^{(1)} \\ m_{79}^{(1)} & m_{73}^{(1)} & m_{77}^{(1)} \end{bmatrix}, \dot{u}^{(1)} = \begin{bmatrix} \dot{u}_9^{(1)} \\ \dot{u}_3^{(1)} \\ \dot{u}_7^{(1)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Como o elemento finito é um triângulo e possui três vértices, a matriz obtida é uma matriz, 3x3 que relaciona as linhas e colunas com as posições determinadas anteriormente, que neste caso são: 9, 3 e 7.

Utilizando o mesmo procedimento podemos obter:

$$k^{1(1)} = \left(k_{ij}^{1(1)} \right)_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} k_{99}^{1(1)} & k_{93}^{1(1)} & k_{97}^{1(1)} \\ k_{39}^{1(1)} & k_{33}^{1(1)} & k_{37}^{1(1)} \\ k_{79}^{1(1)} & k_{73}^{1(1)} & k_{77}^{1(1)} \end{bmatrix},$$

$$k^{2(1)} = \left(k_{ij}^{2(1)} \right)_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} k_{99}^{2(1)} & k_{93}^{2(1)} & k_{97}^{2(1)} \\ k_{39}^{2(1)} & k_{33}^{2(1)} & k_{37}^{2(1)} \\ k_{79}^{2(1)} & k_{73}^{2(1)} & k_{77}^{2(1)} \end{bmatrix} \quad (29)$$

e

$$u^{(1)} = \begin{bmatrix} u_9^{(1)} \\ u_3^{(1)} \\ u_7^{(1)} \end{bmatrix}, \quad f^{(1)} = \begin{bmatrix} f_9^{(1)} \\ f_3^{(1)} \\ f_7^{(1)} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Após obter a matriz elementar de cada elemento, deve-se montar uma única matriz de ordem $N_m \times N_n$, que é chamada de matriz global, onde n e m representa o número de nós da malha. Uma das formas de visualização desta matriz global é apresentada na equação (31).

$$\begin{bmatrix} m^{(1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m^{(2)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m^{(N_e)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}^{(1)} \\ \dot{u}^{(2)} \\ \vdots \\ \dot{u}^{(N_e)} \end{bmatrix} +$$

$$\left(\begin{bmatrix} k^{1(1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k^{1(2)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k^{1(N_e)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k^{2(1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k^{2(2)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k^{2(N_e)} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} u^{(1)} \\ u^{(2)} \\ \vdots \\ u^{(N_e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^{(1)} \\ f^{(2)} \\ \vdots \\ f^{(N_e)} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Neste exemplo existem 12 elementos de forma triangular. Assim, pode-se escrever estes elementos com seus respectivos vértices, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Tabela contendo a posição da matriz elementar

Elemento	l	j	k
1	9	3	7
2	6	3	9
3	5	2	9
4	9	2	6
5	10	1	5
6	8	1	10
7	5	9	10
8	7	4	11
9	11	4	8
10	11	9	7
11	11	8	10
12	9	11	10

Com isto, é possível escrever uma Tabela para cada elemento, representando, assim, sua matriz elementar, conforme Figura 47 a Figura 58. Nestas figuras serão preenchidas as posições da matriz referente à matriz elementar de cada elemento conforme equação (28).

Elemento finito 1											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3			■				■		■		
4											
5											
6											
7			■				■		■		
8											
9			■				■		■		
10											
11											

Figura 47. Matriz elementar do elemento finito 1

Elemento finito 2											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3			■				■		■		
4											
5											
6			■				■		■		
7											
8											
9			■				■		■		
10											
11											

Figura 48. Matriz elementar do elemento finito 2

Elemento finito 3											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2		■			■				■		
3											
4											
5		■			■				■		
6											
7											
8											
9		■			■				■		
10											
11											

Figura 49. Matriz elementar do elemento finito 3

Elemento finito 4											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2		■				■			■		
3											
4											
5											
6		■				■			■		
7											
8											
9		■				■			■		
10											
11											

Figura 50. Matriz elementar do elemento finito 4

Elemento finito 5											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	■				■					■	
2											
3											
4											
5	■				■					■	
6											
7											
8											
9											
10	■				■					■	
11											

Figura 51. Matriz elementar do elemento finito 5

Elemento finito 6											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	■							■		■	
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8	■							■		■	
9											
10	■							■		■	
11											

Figura 52. Matriz elementar do elemento finito 6

Elemento finito 7											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4											
5					■				■	■	
6											
7											
8											
9					■				■	■	
10					■				■	■	
11											

Figura 53. Matriz elementar do elemento finito 7

Elemento finito 8											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4				■			■			■	
5											
6											
7				■			■			■	
8											
9											
10											
11				■			■			■	

Figura 54. Matriz elementar do elemento finito 8

Elemento finito 9											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4				■				■			■
5											
6											
7											
8				■				■			■
9											
10											
11				■				■			■

Figura 55. Matriz elementar do elemento finito 9

Elemento finito 10											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7							■		■		■
8								■		■	
9							■		■		■
10								■		■	
11							■		■		■

Figura 56. Matriz elementar do elemento finito 10

Elemento finito 11											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8								■		■	■
9									■		■
10								■		■	■
11								■		■	■

Figura 57. Matriz elementar do elemento finito 11

Elemento finito 12											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											

Figura 58. Matriz elementar do elemento finito 12

A matriz global é obtida, somando as tabelas representadas nas Figura 47 a Figura 58 que, na realidade, representam as matrizes elementares 11x11 de cada elemento. A estrutura desta matriz pode ser observada na Figura 59, enquanto que a matriz global é apresentada na Figura 60.

Matriz global											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											

Figura 59. Estrutura da matriz global

$$\begin{bmatrix}
 5_{11}+6_{11} & 0 & 0 & 0 & 5_{15} & 0 & 0 & 6_{18} & 0 & 5_{1,10}+6_{1,10} & 0 \\
 0 & 3_{22}+4_{22} & 0 & 0 & 3_{25} & 4_{26} & 0 & 0 & 3_{29}+4_{29} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1_{33}+2_{33} & 0 & 0 & 2_{36} & 1_{37} & 0 & 1_{39}+2_{39} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 8_{44}+9_{44} & 0 & 0 & 8_{47} & 9_{48} & 0 & 0 & 8_{4,11}+9_{4,11} \\
 5_{51} & 3_{52} & 0 & 0 & 3_{55}+5_{55}+7_{55} & 0 & 0 & 0 & 3_{59}+7_{59} & 5_{5,10}+7_{5,10} & 0 \\
 0 & 4_{62} & 2_{63} & 0 & 0 & 2_{66}+4_{66} & 0 & 0 & 2_{69}+4_{69} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1_{73} & 8_{74} & 0 & 0 & 1_{77}+8_{77}+10_{77} & 0 & 1_{79}+10_{79} & 0 & 8_{7,11}+10_{7,11} \\
 6_{81} & 0 & 0 & 9_{84} & 0 & 0 & 0 & 6_{88}+9_{88}+11_{88} & 0 & 6_{8,10}+11_{8,10} & 9_{8,11}+11_{8,11} \\
 0 & 3_{92}+4_{92} & 1_{93}+2_{93} & 0 & 3_{95}+7_{95} & 2_{96}+4_{96} & 1_{97}+10_{97} & 0 & 1_{99}+2_{99}+3_{99}+4_{99} \\
 & & & & & & & & & & & +7_{99}+10_{99}+12_{99} & 7_{9,10}+12_{9,10} & 10_{9,11}+12_{9,11} \\
 5_{10,1}+6_{10,1} & 0 & 0 & 0 & 5_{10,5}+7_{10,5} & 0 & 0 & 6_{10,8}+11_{10,8} & 7_{10,9}+12_{10,9} & 5_{10,10}+6_{10,10}+7_{10,10} \\
 & & & & & & & & & & & +11_{10,10}+12_{10,10} & 11_{10,11}+12_{10,11} \\
 0 & 0 & 0 & 8_{11,4}+9_{11,4} & 0 & 0 & 8_{11,7}+10_{11,7} & 9_{11,8}+11_{11,8} & 10_{11,9}+12_{11,9} & 11_{11,10}+12_{11,10} & 8_{11,11}+9_{11,11}+10_{11,11} \\
 & & & & & & & & & & & +11_{11,11}+12_{11,11}
 \end{bmatrix}$$

Figura 60. Matriz global de ordem 11x11

Conforme (AVILA, 2010) na forma matricial obtem-se:

$$\begin{bmatrix}
 m_{1_1} & 0 & 0 & 0 & m_{1_5} & 0 & 0 & m_{1_8} & 0 & m_{1_10} & 0 \\
 0 & m_{2_2} & 0 & 0 & m_{2_5} & m_{2_6} & 0 & 0 & m_{2_9} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & m_{3_3} & 0 & 0 & m_{3_6} & m_{3_7} & 0 & m_{3_9} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & m_{4_4} & 0 & 0 & m_{4_7} & m_{4_8} & 0 & 0 & m_{4_11} \\
 m_{5_1} & m_{5_2} & 0 & 0 & m_{5_5} & 0 & 0 & 0 & m_{5_9} & m_{5_10} & 0 \\
 0 & m_{6_2} & m_{6_3} & 0 & 0 & m_{6_6} & 0 & 0 & m_{6_9} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & m_{7_3} & m_{7_4} & 0 & 0 & m_{7_7} & 0 & m_{7_9} & 0 & m_{7_11} \\
 m_{8_1} & 0 & 0 & m_{8_4} & 0 & 0 & 0 & m_{8_8} & 0 & m_{8_10} & m_{8_11} \\
 0 & m_{9_2} & m_{9_3} & 0 & m_{9_5} & m_{9_6} & m_{9_7} & 0 & m_{9_9} & m_{9_10} & m_{9_11} \\
 m_{10_1} & 0 & 0 & 0 & m_{10_5} & 0 & 0 & m_{10_8} & m_{10_9} & m_{10_10} & m_{10_11} \\
 0 & 0 & 0 & m_{11_4} & 0 & 0 & m_{11_7} & m_{11_8} & m_{11_9} & m_{11_10} & m_{11_11}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \cdot \\
 u_1 \\
 \cdot \\
 u_2 \\
 \cdot \\
 u_3 \\
 \cdot \\
 u_4 \\
 \cdot \\
 u_5 \\
 \cdot \\
 u_6 \\
 \cdot \\
 u_7 \\
 \cdot \\
 u_8 \\
 \cdot \\
 u_9 \\
 \cdot \\
 u_{10} \\
 \cdot \\
 u_{11}
 \end{bmatrix}
 +
 \begin{bmatrix}
 k_{1_1} & 0 & 0 & 0 & k_{1_5} & 0 & 0 & k_{1_8} & 0 & k_{1_10} & 0 \\
 0 & k_{2_2} & 0 & 0 & k_{2_5} & k_{2_6} & 0 & 0 & k_{2_9} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & k_{3_3} & 0 & 0 & k_{3_6} & k_{3_7} & 0 & k_{3_9} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & k_{4_4} & 0 & 0 & k_{4_7} & k_{4_8} & 0 & 0 & k_{4_11} \\
 k_{5_1} & k_{5_2} & 0 & 0 & k_{5_5} & 0 & 0 & 0 & k_{5_9} & k_{5_10} & 0 \\
 0 & k_{6_2} & k_{6_3} & 0 & 0 & k_{6_6} & 0 & 0 & k_{6_9} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & k_{7_3} & k_{7_4} & 0 & 0 & k_{7_7} & 0 & k_{7_9} & 0 & k_{7_11} \\
 k_{8_1} & 0 & 0 & m_{8_4} & 0 & 0 & 0 & k_{8_8} & 0 & k_{8_10} & k_{8_11} \\
 0 & k_{9_2} & k_{9_3} & 0 & k_{9_5} & k_{9_6} & k_{9_7} & 0 & k_{9_9} & k_{9_10} & k_{9_11} \\
 k_{10_1} & 0 & 0 & 0 & k_{10_5} & 0 & 0 & k_{10_8} & k_{10_9} & k_{10_10} & k_{10_11} \\
 0 & 0 & 0 & k_{11_4} & 0 & 0 & k_{11_7} & k_{11_8} & k_{11_9} & k_{11_10} & k_{11_11}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 u_1 \\
 u_2 \\
 u_3 \\
 u_4 \\
 u_5 \\
 u_6 \\
 u_7 \\
 u_8 \\
 u_9 \\
 u_{10} \\
 u_{11}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 f_1 \\
 f_2 \\
 f_3 \\
 f_4 \\
 f_5 \\
 f_6 \\
 f_7 \\
 f_8 \\
 f_9 \\
 f_{10} \\
 f_{11}
 \end{bmatrix}$$

$$M^g \dot{u}^g + (K^{1g} - K^{2g})u^g = f^g \quad (32)$$

$$M^g \dot{u}^g + K^g u^g = f^g \quad (33)$$

Onde:

$$f^g = 0$$

$$K^g = K^{1g} - K^{2g}$$

4.4. Vantagens e desvantagens

O MEF possui várias vantagens em relação a outros métodos numéricos. Dentre elas, pode-se citar:

- As propriedades físicas dos materiais utilizados no problema não precisam ser as mesmas; com isto, é possível resolver um problema quando existe a presença de vários tipos de materiais;
- As fronteiras irregulares da superfície podem ser aproximadas utilizando elementos com dimensões apropriadas ou ainda utilizando elementos com curvas;
- Os elementos utilizados na resolução do problema pode ser definidos com diversos tamanhos, o que facilita na adaptação dos elementos quando há necessidade de maior precisão.

A principal desvantagem encontrada neste método é a necessidade da utilização de programas computacionais dedicados à resolução do mesmo. Além desta necessidade, este método utiliza uma grande quantidade de processamento o que querer uma boa memória quando trabalha-se com problemas complexos. Entretanto, com a redução de preço dos processadores nos últimos anos esta desvantagem acaba não sendo crítica (RICCI e TAVARES, 2005).

4.5. MEF aplicado à eletrostática

A aplicação do MEF à Eletrostática tem embasamento na lei de Gauss, sintetizada pela equação (11) (CARDOSO, 1999). Através desta equação, pode-se verificar que o vetor deslocamento D está relacionado com o campo elétrico através da equação (34) da densidade de campo:

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (34)$$

Onde:

E é o campo elétrico [N/C];

D é o vetor densidade de fluxo elétrico [C/m²];

ε = permissividade elétrica do meio [F/m]

O campo elétrico E está relacionado com o potencial elétrico através da equação (35):

$$E = -\nabla V \quad (35)$$

Em um elemento finito de forma triangular, seu domínio é representado pelos vértices V_1 , V_2 e V_3 , conforme Figura 61.

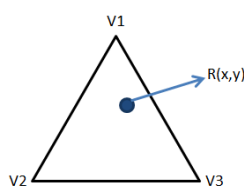


Figura 61. Elemento finito na forma triangular

Para este tipo de elemento finito, a expressão do potencial elétrico pode ser expressa pela equação (36):

$$V_{(x,y)} = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (36)$$

Onde os coeficientes α_1 , α_2 e α_3 são funções respectivas de V_1 , V_2 e V_3 que representam o potencial elétrico do ponto R contido no centro deste triângulo.

A partir dessa equação, é possível obter os valores de V_1 , V_2 e V_3 que correspondem a:

$$V_1 = a_1 + a_2x_1 + a_3y_1 \quad (37)$$

$$V_2 = a_1 + a_2x_2 + a_3y_2 \quad (38)$$

$$V_3 = a_1 + a_2x_3 + a_3y_3 \quad (39)$$

Assim, a solução do problema é apresentada a seguir:

$$\alpha_1 = \left(\frac{1}{2\Delta}\right) \times (a_1V_1 + a_2V_2 + a_3V_3) \quad (40)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{1}{2\Delta}\right) \times (b_1V_1 + b_2V_2 + b_3V_3) \quad (41)$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{1}{2\Delta}\right) \times (c_1V_1 + c_2V_2 + c_3V_3) \quad (42)$$

Onde os coeficientes a, b e c são obtidos por rotação cíclica dos seus índices e Δ representa a área do elemento finito (CARDOSO, 1999).

Conforme (CARDOSO, 1999), resolvendo (40),(41),(42) obtém-se:

$$a_1 = x_2y_3 - x_3y_2 \quad (43)$$

$$b_1 = y_2 - y_3 \quad (44)$$

$$c_1 = x_3 - x_2 \quad (45)$$

$$\Delta = \frac{(b_1c_2 - b_2c_1)}{2} \quad (46)$$

Sendo possível também resolver estas variáveis através de seus respectivos determinantes:

$$a_1 = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} V_1 & x_1 & y_1 \\ V_2 & x_2 & y_2 \\ V_3 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (47)$$

$$a_2 = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} 1 & V_1 & y_1 \\ 1 & V_2 & y_2 \\ 1 & V_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (48)$$

$$a_3 = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & V_1 \\ 1 & x_2 & V_2 \\ 1 & x_3 & V_3 \end{vmatrix} \quad (49)$$

$$D = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (50)$$

Sendo D o valor referente a duas vezes a área do triângulo.

O potencial elétrico em um ponto qualquer dentro do elemento é obtido substituindo (43),(44),(45) em (36) ou (47),(48),(49) em (36):

$$V_{(x,y)} = N_1 V_1 + N_2 V_2 + N_3 V_3 \quad (51)$$

Utilizando as equações (35) e (51) é possível escrever as duas componentes do campo elétrico conforme equações (52) e (53), onde dentro do elemento finito, o campo elétrico, torna-se constante para a aproximação da função potencial.

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} = -\left(\frac{1}{2\Delta}\right) \times (b_1 V_1 + b_2 V_2 + b_3 V_3) \quad (52)$$

$$E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} = -\left(\frac{1}{2\Delta}\right) \times (c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 V_3) \quad (53)$$

Onde:

E_x representa a componente do eixo x do campo elétrico;

E_y representa a componente do eixo y do campo elétrico;

Δ representa a área do elemento finito;

Os coeficientes b e c são obtidos por rotação cíclica dos seus índices (CARDOSO, 1999).

Conforme citado anteriormente, quanto maior o número de elementos utilizados na resolução do sistema, maior será a precisão da resposta obtida, em contrapartida, mais complexa ficará a resolução do sistema.

4.5.1. Exemplo de aplicação

A Figura 62 apresenta um resistor que possui comprimento 2 m, largura 1 m e profundidade 1 m. Este resistor possui uma condutividade de 2 S/m. Em suas laterais é aplicada uma tensão (diferença de potencial) de 100V. Deseja-se saber a distribuição de potenciais e o campo elétrico no interior do resistor de cada elemento finito.

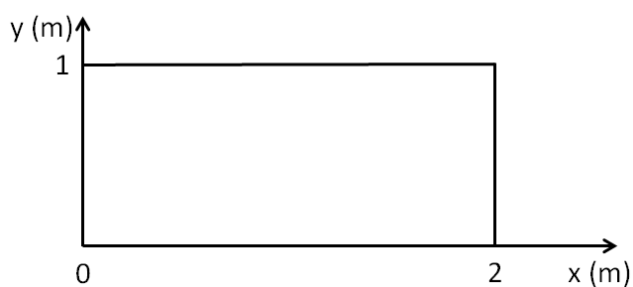


Figura 62. Dimensões do resistor

Essa superfície será dividida em 4 elementos, conforme Figura 63.

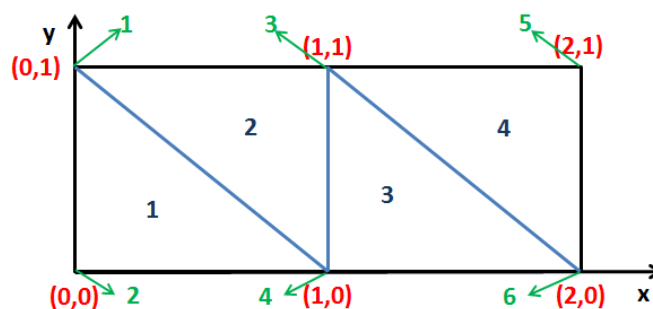


Figura 63. Resistor dividido em elementos finitos

Na Figura 63 o resistor foi dividido em quatro elementos finitos, numerados na cor azul, enquanto que os números na cor verde representam os vértices da malha. As coordenadas destes vértices são mostradas em vermelho.

A montagem das matrizes dos elementos pode ser visualizada na Tabela 3, sendo que a primeira linha representa o número referente a cada vértice do triângulo e a segunda linha representa os nós deste elemento finito.

Tabela 3. Numeração para montagem da matriz do elemento1

Numeração local	1	2	3
Numeração Global	1	2	4

Conforme descrito em (CARDOSO, 1999) as matrizes dos elementos são:

Matriz do elemento 1:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (54)$$

Matriz do elemento 2:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (55)$$

Matriz do elemento 3:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (56)$$

Matriz do elemento 4:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (57)$$

Estas matrizes são montadas tomando como base as posições dos elementos finitos em sua posição x, y, z.

Com isto, pode-se montar a matriz global do problema que é apresentada pela equação (58).

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & 4 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (58)$$

Como descrito anteriormente, tem-se um potencial elétrico de 100 V nos nós 1 e 2 e potencial zero nos nós 5 e 6. Utilizando as condições de contorno, pode-se montar a matriz para resolução do problema conforme a equação (59).

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & 4 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \\ 100 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (59)$$

Com a resolução deste sistema, obtém-se:

$$V_1 = 100V$$

$$V_2 = 100V$$

$$V_3 = 50V$$

$$V_4 = 50V$$

$$V_5 = 0V$$

$$V_6 = 0V$$

O campo elétrico do elemento 1 é:

$$E_{x1} = -[0x100 + (-1)x100 + (1)x50] = 50 V/m \quad (60)$$

$$E_{y1} = -[1x100 + (-1)x100 + 0x50] = 0 V/m \quad (61)$$

Para os elementos 2, 3 e 4 serão obtidos os mesmos valores que o encontrados para o elemento 1.

Em problemas envolvendo eletrostática, algumas superfícies apresentam simetria de revolução, como por exemplo, solenoides, cabos e isoladores. Assim, mesmo estas superfícies apresentando geometrias de peças tridimensionais, é possível representá-las em duas dimensões (2D), em virtude desta existência de simetria axial. Entretanto, para a solução correta do problema destas superfícies, é necessário realizar uma correção na sua formulação numérica (CARDOSO, 1999).

4.6. Programas utilizando MEF

Atualmente, existem muitos *softwares* dedicados à resolução de problemas utilizando o MEF, como por exemplo: ANSYS, NASTRAN/PATRAN, ADAMS, ABAQUS, LMAG2D, FLUX, SIMULIA, ACTRAN, AcuSolve, ADINA, ALGOR, CAST3M, COMSOL, COSMOSWorks, COULOMB, SAP2000, Field Precision LLC, NISA, Quickfield, Gmsh, dentre outros (ANSYS, 2012) (MSC SOFTWARE, 2011) (MSC SOFTWARE, 2012) (DASSAULT SYSTEMES, 2002) (CARDOSO, 1999) (MAGSOFT CORPORATION, 2012) (DASSAULT SYSTEMES, 2002) (MSC SOFTWARE, 2011) (ACUSIM SOFTWARE, 2010) (ADINA, 2012) (AUTODESK, 2012) (AUDILAB SOFTWARE, 2005) (COMSOL, 1998) (DASSAULT SYSTEMES,

2012) (INTEGRATED ENGINEERING SOFTWARE, 2012) (COMPUTERS & STRUCTURES. INC., 2012) (FIELD PRECISION, 1998) (NISA, 2011) (QUICKFIELD, 2012) (GEUZ, 2012).

Dentre estes programas, alguns são de domínio público (*software* livre) como, por exemplo: LMAG2D, SAP2000, Quickfield e Gmsh. Entretanto, independentemente do *software* utilizado, o mesmo deve possuir três etapas, sendo elas: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

O pré-processamento é a etapa que realiza o desenho da geometria do objeto em estudo, geração da malha e imposição das propriedades físicas dos meios. A etapa de processamento realiza a montagem do sistema de equações e a sua resolução. E na etapa do pós-processamento são apresentadas as grandezas dos fenômenos estudados.

Vários trabalhos envolvendo a aplicação do MEF à Eletrostática podem ser encontrados em (HAMOUZ, 1998) (BIASOTTO, 2009) (MIRANDA, 2004) (KLIPPEL, 2000), utilizando os mais variados programas de simulações.

5. METODOLOGIA

Conforme citado anteriormente, esta dissertação tem por objetivo verificar a distribuição do campo elétrico em um isolador polimérico da classe de tensão de 500 kV, mediante alterações dimensionais do anel anti-corona de tubo circular instalado nesse isolador. Mais ainda, este trabalho pretende verificar a interferência gerada por este campo elétrico em sinais de comunicação na faixa de frequência de 915 MHz. Assim, a metodologia deste trabalho encontra-se dividida em três etapas:

- Simulação;
- Modelagem matemática;
- Ensaio laboratoriais.

A etapa de simulação compreende ao estudo da influência das dimensões do anel anti-corona no campo elétrico aplicado no terminal fase de um isolador polimérico de alta tensão.

A etapa de modelagem matemática corresponde à etapa que é responsável pela determinação de um modelo que seja capaz de representar a influência das dimensões do anel anti-corona no campo elétrico do isolador.

A etapa de ensaios laboratoriais é responsável por determinar se a utilização de uma frequência de 915 MHz, que possui tecnologia e equipamentos consolidados, combinada com uma alta eficiência energética, pode ser utilizada para sensores em isoladores poliméricos de alta tensão, através da verificação da interferência eletromagnética gerada pelo campo elétrico decorrente do terminal fase deste isolador.

5.1. Simulação

5.1.1. Exemplo de solução utilizando o MEF

Esta etapa do trabalho verificou a influência das dimensões do anel anti-corona no campo elétrico em um isolador polimérico da classe de tensão de 500 kV, fabricado pela Indústria Eletromecânica Balestro Ltda. O modelo do isolador utilizado neste trabalho é o IPB 500/CB/120/EAP/117, que contém uma distância de arco de 3.065 mm e distância de fuga de 13.700 mm. As demais características deste isolador encontram-se no Anexo E. Este isolador e o anel anti-corona, possuem geometria de simetria axial, tornando possível o seu desenho em duas dimensões e, no momento do processamento da resolução do sistema, o *software* empregado realiza a simulação das linhas de campo na simetria de raio 2π (SILVA, MOTA e M., 2011).

Conforme citado anteriormente, neste trabalho, não foi considerada a estrutura da torre de transmissão, o tipo de arranjo dos cabos da LT e nem uma possível diferença de potencial no terminal terra do isolador devido a sua impedância e altura da estrutura da torre de transmissão.

O campo elétrico foi simulado na linha de corte da interface silicone/ar do isolador, conforme Figura 64.

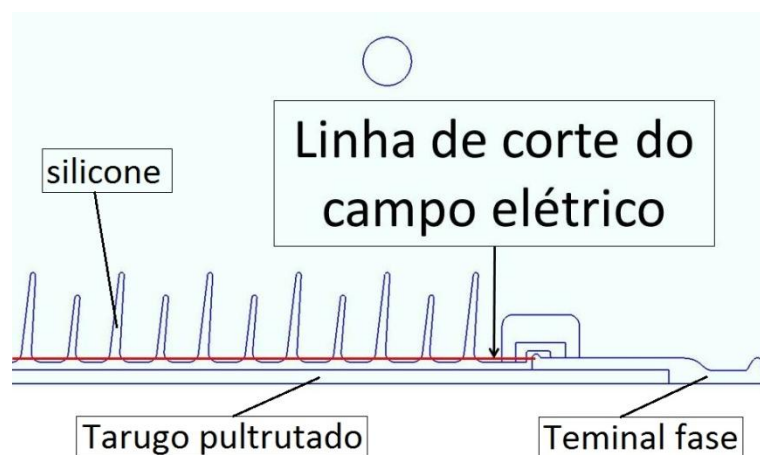


Figura 64. Linha de corte do campo elétrico

As propriedades físicas do isolador e do anel anti-corona utilizadas neste projeto foram:

- Aço Carbono 1020 – material utilizado na fabricação dos terminais concha e bola;
- Fibra de vidro – material utilizado na fabricação do tarugo pultrudado utilizado para dar sustentação mecânica ao isolador;
- Silicone – material utilizado para revestimento do tarugo pultrudado;
- Alumínio – material utilizado na fabricação do anel anti-corona;
- Ar – demais superfícies.

A Figura 65 ilustra as propriedades físicas do isolador polimérico em estudo.

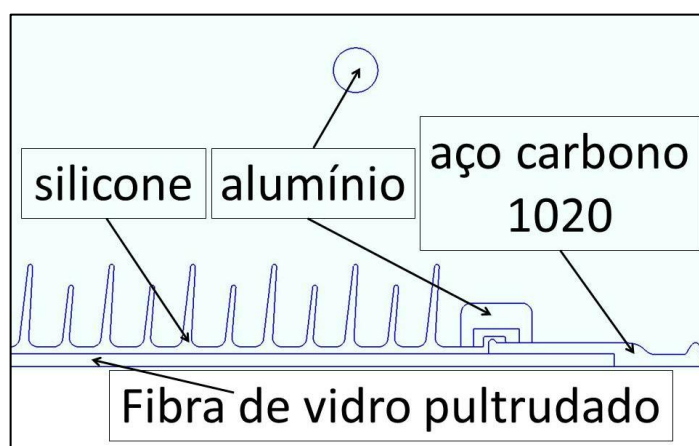


Figura 65. Propriedades físicas do isolador

Nas simulações, foram realizadas variações das dimensões físicas do anel anti-corona. Para um melhor entendimento, no decorrer deste trabalho será considerado como "d" o diâmetro do condutor do anel anti-corona, "h" a altura do anel anti-corona e "r" como a distância do centro do condutor do anel anti-corona até o centro do núcleo do isolador, conforme apresenta a Figura 66.

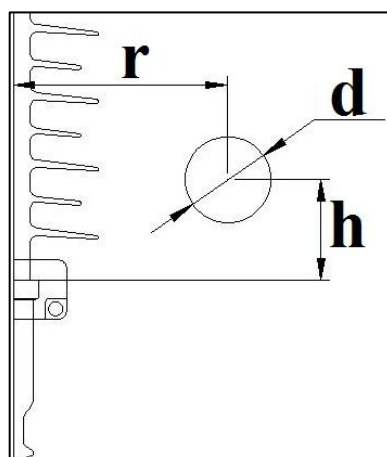


Figura 66. Dimensões do anel anti-corona estudadas

Para cada simulação realizada, apenas uma das três dimensões estudadas foi variada. Após o estudo desta dimensão, foi realizado, isoladamente, o estudo de outra dimensão até que todas as três fossem estudadas. Inicialmente, foi realizada a variação da dimensão "r", mantendo constantes "h" e "d". Em seguida, foi realizada a variação de "h" e, depois, a variação de "d".

As unidades de variação das dimensões foram:

- Para a dimensão "d": intervalo de variação de 1,0 cm até 41,0 cm, variando 2,0 cm por simulação;
- Para a dimensão "r": variação de 0,5 cm por simulação, começando do ponto no qual o diâmetro externo fica mais próximo da aleta do isolador até a distância de 75 cm do centro do condutor do anel anti-corona até o núcleo do isolador;
- Para a dimensão "h": intervalo de variação de 3,0 cm até 20,0 cm, variando 1,0 cm por simulação.

O campo elétrico sem a presença do anel anti-corona apresenta o comportamento conforme Figura 67.

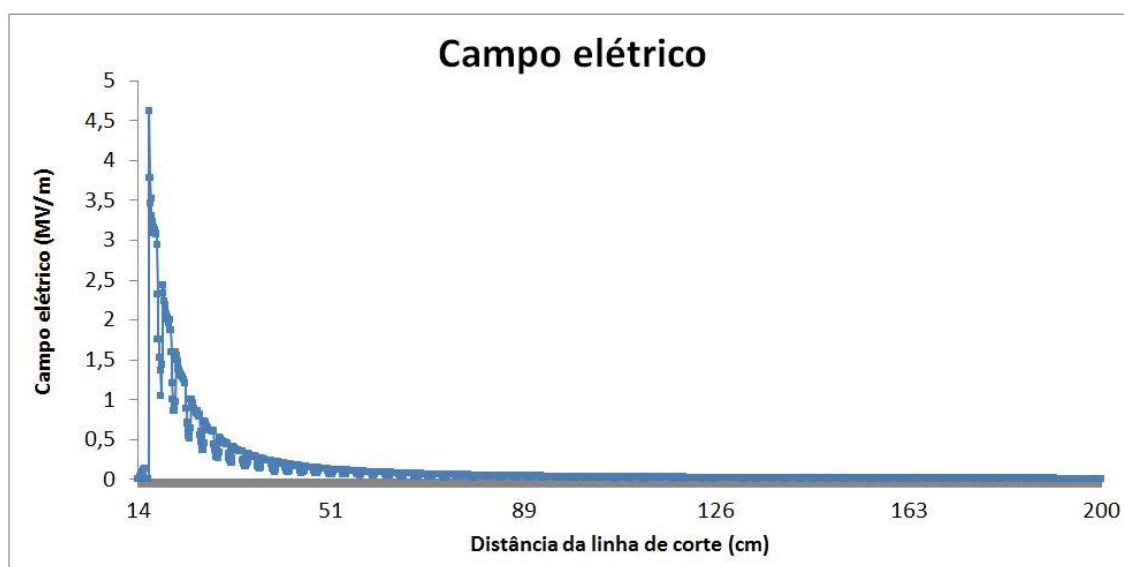


Figura 67. Intensidade do campo elétrico no isolador polimérico da classe de tensão 500 kV, sem anel anti-corona

Nessa figura, a distância da linha de corte corresponde à interface silicone/ar do isolador, conforme Figura 64. É possível observar que a intensidade do campo elétrico apresenta um pico na proximidade do terminal fase e tende a cair no decorrer do isolador, devido às suas propriedades dielétricas.

O gráfico da intensidade do campo elétrico de um isolador polimérico da classe de 500 kV, com a presença do anti-corona pode ser visualizado na Figura 68. Ao inserir um anel anti-corona, é possível observar que o pico inicial da intensidade do campo elétrico cai. Em contrapartida, existe a formação de outro pico de intensidade do campo elétrico.

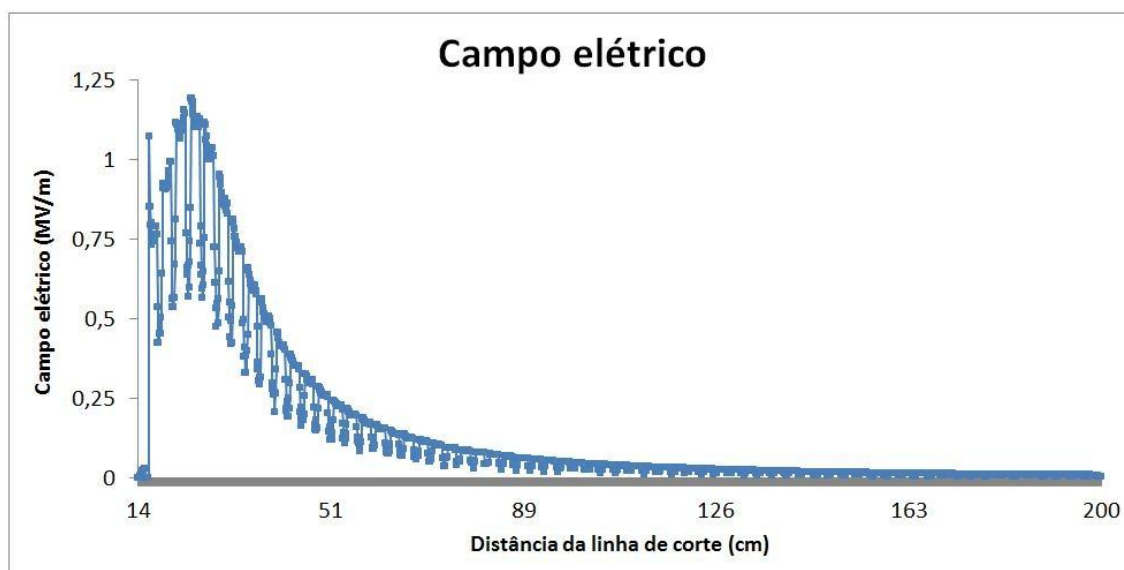


Figura 68. Intensidade do campo elétrico no isolador polimérico da classe de tensão 500 kV, com anel anti-corona

Ao longo do texto, esses picos serão denominados de 1º e 2º picos, respectivamente, conforme Figura 69.

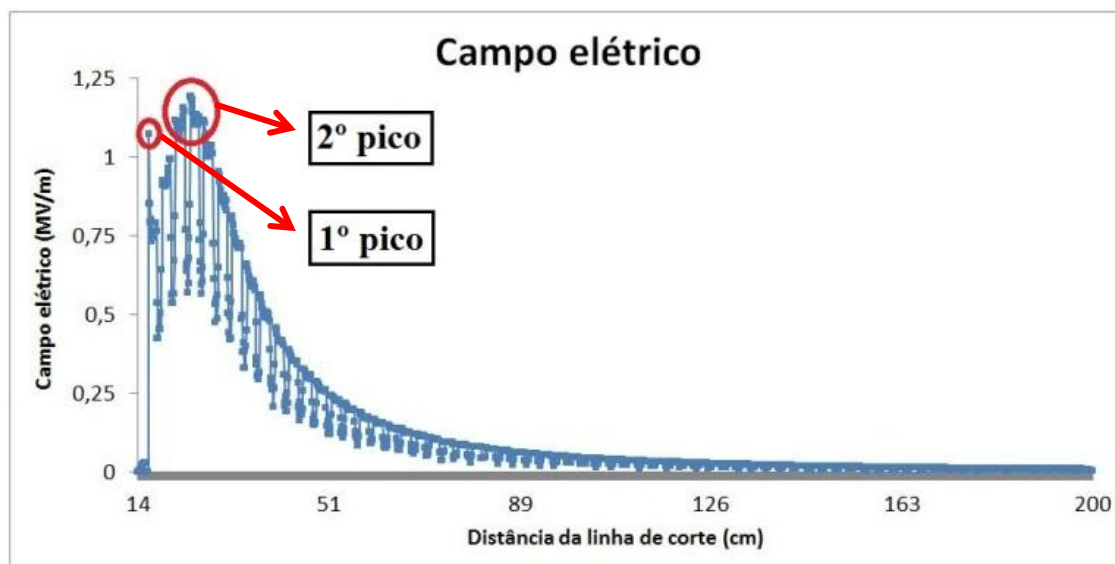


Figura 69. Indicação do 1º e do 2º picos de intensidade do campo elétrico

Conforme a Figura 69, a intensidade do campo elétrico do 1º pico é decorrente do terminal fase do isolador, enquanto que a intensidade do campo elétrico do 2º pico é decorrente da presença do anel anti-corona.

Foi admitido, neste trabalho, que o valor ótimo da intensidade do campo elétrico corresponde ao momento em que o 1º pico e o 2º pico apresentaram a mesma intensidade, conforme pode ser visualizado na Figura 70.

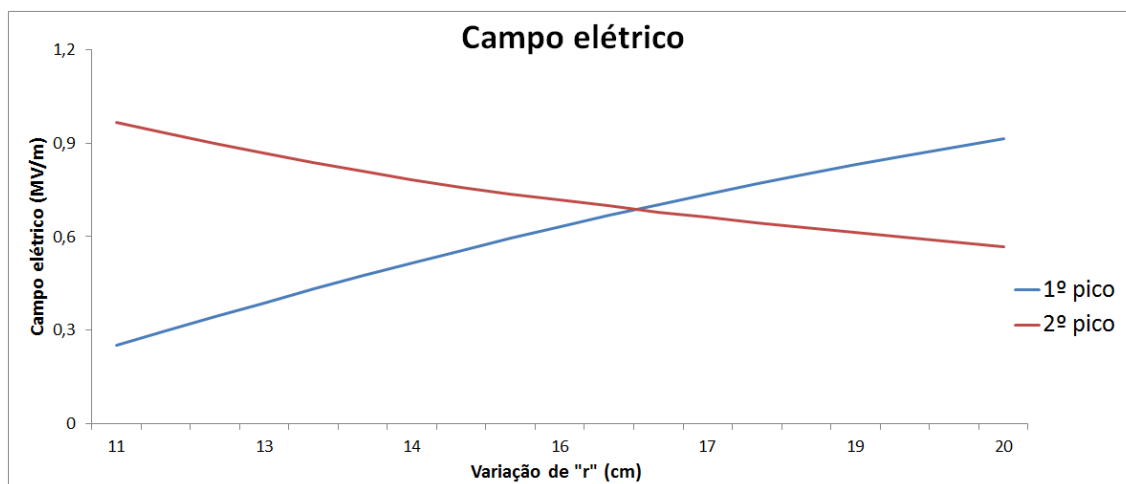


Figura 70. Interseção do 1º e 2º pico do campo elétrico

Na Figura 70 é demonstrado o gráfico de simulações realizadas com o diâmetro do anel anti-corona (“d”) igual a 9,0 cm e altura (“h”) igual a 6,0 cm, sendo variada a distância do centro do anel anti-corona em relação ao núcleo do isolador (“r”), e é possível observar que o 1º pico cresce a medida que a distância em relação ao centro aumenta, enquanto que com o 2º pico ocorre o inverso. Com isto, a menor intensidade do campo elétrico é obtida quando estas duas curvas se intercedem.

5.1.2. Softwares utilizados

Neste projeto, foram utilizados, na etapa de pré-processamento, para desenhar a geometria do objeto, o programa *Hypertext Preprocessor* (PHP) (versão 5.3.1) (PHP GROUP, 2001) e para realizar a geração da malha e imposição das propriedades físicas dos meios, o programa Gmsh (versão 2.5.0) (GEUZINE e REMADE, 2012). No processamento, para a montagem do sistema de equações e resolução, foi utilizado o programa GetDP (versão 2.2.1) (DULAR e GEUZINE, 2012), enquanto que na etapa de pós-processamento, na qual é apresentada as grandezas dos fenômenos estudados, foi utilizado o programa

Getdp e Gmsh. Para a criação de gráficos, foi utilizado o programa Excel (versão 2010) (MICROSOFT, 2012).

5.1.2.1. Gmsh

O programa Gmsh foi desenvolvido por Christophe Geuzaine e Jean-François Remache (GEUZINE e REMADE, 2012) e, inicialmente, tinha a finalidade de ser um programa acadêmico. Entretanto, com o passar dos anos, este programa foi se aperfeiçoando e está sendo utilizado por várias empresas como programa para geração de malhas bidimensional e tridimensional. O Gmsh é um programa livre e pode ser obtido pelo site do seu desenvolvedor (GEUZINE e REMADE, 2012), com versões para Windows, Linux e Mac OS X. Também é possível baixar seu código fonte para quem deseja realizar algum incremento no programa.

O Gmsh apresenta quatro módulos: Geometry, Mesh, Solver e Post-processing.

5.1.2.1.1. Geometry

Neste menu, permite-se realizar o desenho da geometria do objeto sob estudo, utilizando pontos, linhas, superfícies e volumes. Além de realizar a determinação física dos elementos presentes no objeto sob estudo (MALAGONI, 2012). Esta determinação física é o processo de informar ao programa a composição do objeto sob estudo, por exemplo, alumínio, silicone, ar, etc. O Gmsh possibilita ao usuário desenhar a geometria de diversos modos: diretamente pelo menu, escrevendo dentro do próprio Gmsh ou realizando o *script* de programação de linguagem própria do Gmsh.

5.1.2.1.2. Mesh

Agrupa vários algoritmos de geração de malhas 1D, 2D e 3D. É possível gerar malhas estruturadas e não estruturadas. Quando é realizada a simulação axissimétrica, exige-se uma malha refinada próxima ao eixo de simetria e menos refinada à medida que se distancia deste eixo (MALAGONI, 2012). Neste módulo, é possível realizar um refinamento mais detalhado da malha em locais específicos, por exemplo, quando deseja-se medir o campo elétrico em um local específico do objeto sob estudo. Este módulo cria um arquivo com extensão *.msh, contendo as coordenadas dos nós dos elementos finitos e a numeração global destes elementos.

5.1.2.1.3. Solver

Neste menu, existe uma interface com programas externos que possuem a finalidade de solucionar os problemas físicos e cálculos numéricos para solução dos problemas em questão (MALAGONI, 2012).

5.1.2.1.4. Post-processing

Inclui a seção de cálculo, cores de mapas, animações, gráficos vetoriais e outras visualizações da simulação. As funções do menu “post-processing” pode ser acessada de forma interativa ou através do *script* de arquivos de entrada (MALAGONI, 2012).

5.1.2.2. PHP

A linguagem PHP é uma linguagem interpretada e é principalmente utilizada no desenvolvimento *web*. O PHP difere de outros *scripts CGI* (“*Common Gateway Interface*”), pois ao invés de escrever vários comandos para imprimir o HTML, é escrito apenas um arquivo HTML com os códigos PHP embutidos no HTML, delimitados por *tags* de início e de fim. O PHP é multiplataforma, podendo

ser utilizado na maioria dos Sistemas Operacionais (SO) *OpenSource*, e diferentes *scripts* como o *JavaScript* (CASTELA, 2012).

Na etapa de processamento, para o desenho da geometria do isolador e do anel anti-corona, optou-se pela utilização deste programa, pois já se tinha conhecimento acerca desse programa.

5.1.2.3. GetDP

O *software* GetDP é livre e pode ser obtido em (DULAR e GEUZAINÉ, 2012), desenvolvido por Patrick Dulare Christophe Geuzainé. Este programa permite a definição de qualquer problema e conta com um número limitado de objetos, tornando-o estruturado e conciso. É empregado para a solução numérica de equações diferenciais e integrais, e de problemas em uma, duas ou três dimensões.

Além disso, pode ser facilmente acoplado ao programa Gmsh (MALAGONI, 2012).

5.1.3. Desenvolvimento da simulação

Apesar de o programa Gmsh possuir uma linguagem própria de programação para o desenho da geometria do objeto, neste trabalho, conforme citado anteriormente, optou-se pela elaboração de uma programação em linguagem PHP que realizasse esta função.

O isolador sob estudo possui 117 aletas (saias), possuindo o perfil EAP (Extra Alta Poluição) com duas dimensões de aletas, a maior com diâmetro de 138 mm e a menor com 110 mm, conforme Figura 71.

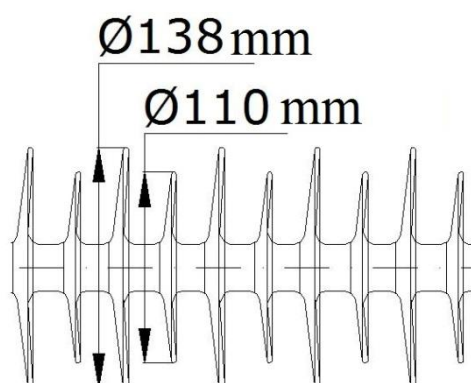


Figura 71. Diâmetro das aletas do isolador

Com isto, foi possível desenhar apenas um conjunto de aletas (uma aleta maior e uma aleta menor) e replicar para as demais através de um *loop* no programa PHP.

A lógica do programa desenvolvido segue na Figura 72.

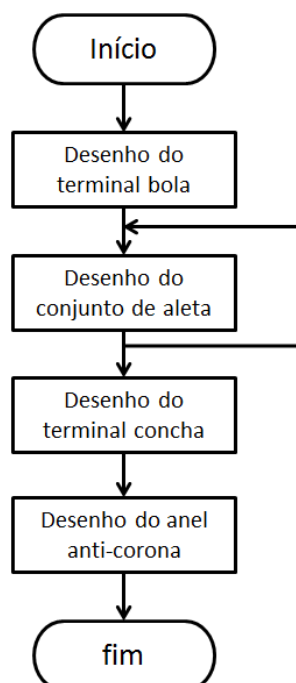


Figura 72. Fluxograma do programa desenvolvido em PHP

Na Figura 72, é possível observar que, inicialmente, foi realizado o desenho do terminal bola, que é o terminal fase do isolador. Posteriormente, foi realizado o desenho do conjunto de aletas. Para este modelo de isolador, o

conjunto de duas aletas foi realizado através do comando *for* repetindo estas aletas 58 vezes, obtendo assim 116 aletas (sendo 58 aletas maiores e 58 menores, intercaladas) e mais uma aleta grande para finalizar o desenho das aletas, ficando assim o isolador com 117 aletas. Depois, foi desenhado o terminal concha, terminal terra, do isolador. Finalmente, foi realizado o desenho do anel anti-corona.

No anel anti-corona, foram definidas variáveis como referências para o desenho. Assim, o desenho do anel pode ser realizado pela inserção dos valores dessas variáveis em um arquivo *.dat.

A programação desenvolvida em PHP para o desenho da geometria do isolador é apresentada no Anexo F.

Após rodar o programa desenvolvido em PHP em uma plataforma *Web* e, neste caso, foi utilizado o programa XAMPP (SEIDLER, 2011), obteve-se, na tela do navegador, as linhas de comando que representam o desenho do isolador estudado. Este arquivo foi salvo com extensão *.geo, que é a extensão que o programa Gmsh utiliza para o desenho da geometria do objeto sob estudo.

Na definição de pontos do programa Gmsh, é apresentada uma sequência de quatro valores, como no exemplo a seguir:

$$\text{Point}(x) = \{1.7, 4.1, 0, 0.001\};$$

O valor *x* representa o número sequencial de pontos utilizados para realizar a geometria do desenho. O primeiro número entre chaves representa a posição do ponto na coordenada *x*, enquanto que o segundo e terceiro, representam respectivamente, as coordenadas *y* e *z*. Como são utilizadas duas dimensões, a coordenada “*z*” sempre é nula. O último número representa a densidade da malha, sendo que quanto menor o número, maior a quantidade de elementos finitos e maior o tempo de processamento.

É possível deixar a malha mais densa em determinada região onde se necessita de maior precisão dos resultados. Neste trabalho, esta região corresponde à região próxima da linha de corte do campo elétrico, conforme

apresentado na Figura 64. Uma malha mais densa pode ser obtida, utilizando o comando “TransfiniteLine”, identificando o número da linha e quantos elementos são necessários, conforme modelo a seguir.

TransfiniteLine{19} = 20 ;

Neste exemplo, a linha 19 terá 20 elementos.

Em seguida, foi realizada a delimitação da superfície das propriedades físicas que compõe o isolador. O método para delimitação destas superfícies é apresentado em (MARIANO RE, 2011). Através do comando “PhysicalSurface” são impostas as permissividades dos materiais que serão utilizados no projeto.

Posteriormente, são aplicadas as condições de Dirichlet (PINEDO, 2010), potencial fase (tensão fase-terra do sistema) e potencial terra (0 V), através do comando “PhysicalLine”. Enquanto que nos demais pontos é aplicada a condição de Neumann (REIS, 2008). Após isto, a geração da malha é realizada automaticamente pelo programa Gmsh, através do comando Mesh – 2D, conforme Figura 73.

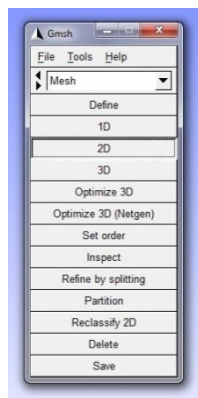


Figura 73. Comando para geração de malhas

Após a geração da malha, é possível salva-la em um arquivo *.msh, que é utilizado pelo programa *solver* na solução do problema. Um exemplo de arquivo *.msh é apresentado na Figura 74.

```

circ2.msh - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

$NOD
9
1 0 0 0
2 0 4 0
3 0 7 0
4 1 7 0
5 1 4 0
6 7 7 0
7 3.499999999998538 0.9378221735004884 0
8 6.062177826494128 3.50000000005295 0
9 3.712435565295901 4.487564434701157 0
$ENDNOD

$ELM
24
1 15 0 1 1 1
2 15 0 2 1 2
3 15 0 3 1 3
4 15 0 4 1 4
5 15 0 5 1 5
6 15 0 6 1 6
7 1 0 1 2 1 2
8 1 0 2 2 2 5
9 1 0 3 2 5 4
10 1 0 4 2 4 3
11 1 0 5 2 3 2
12 1 0 6 2 6 4
13 1 0 7 2 1 7
14 1 0 7 2 7 8
15 1 0 7 2 8 6
16 2 0 9 3 1 7 5
17 2 0 9 3 1 5 2
18 2 0 9 3 5 7 9
19 2 0 9 3 9 7 8
20 2 0 9 3 9 4 5
21 2 0 9 3 6 4 9
22 2 0 9 3 6 9 8
23 2 0 11 3 2 5 3
24 2 0 11 3 5 4 3
$ENDELM

```

Figura 74. Arquivo gerado pela formação de malha (AREND, 2009)

Os comandos \$NOD e \$ENDNOD informam o número e a localização dos nós globais. A primeira linha abaixo do comando \$NOD apresenta o número de nós da malha, enquanto que as demais linhas que antecedem o comando \$ENDNOD apresentam as coordenadas dos nós.

Os comandos \$ELM e \$ENDELM apresentam as informações sobre os elementos. Neste exemplo, há um total de 24 elementos. No programa *solver*, apenas as informações contidas nos índices a), b) e c) são lidas e armazenadas.

O programa lê o índice a) e armazena todas as linhas e colunas relacionadas, indicando as condições de contorno; o índice b) indica os valores de numeração global dos elementos, enquanto que o índice c) está relacionado com o índice a). Este relacionamento está vinculado pela forma de programação do GetDP (AREND, 2009).

O *software solver* utilizado foi o Getdp, onde a estrutura para resolução do problema é apresentada na Figura 75.

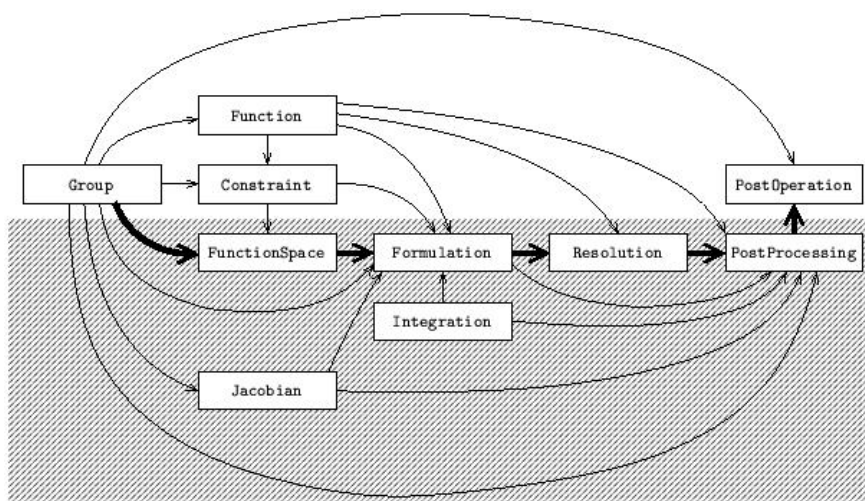


Figura 75. Estrutura para solução de problemas utilizando o programa GetDP (DULAR e GEUZAINÉ, 2009)

Como pode-se observar na Figura 75, a resolução de problemas utilizando o programa GetDP utiliza 10 objetos:

Group: define as entidades topológicas. Estas entidades são as regiões e funções de grupos que definem as listas de entidades geométricas;

Function: define as entidades globais. A função pode ser global, no espaço ou em grupos determinados em certa região, como por exemplo, a característica física;

Constraint: especifica as restrições definidas em *FunctionSpace*. As restrições podem ser identificadas em *FunctionSpace* para serem utilizadas nas condições de contorno;

FunctionSpace: construção de função de espaço. Caracterizado por campos interpolados, por uma ou várias funções. Várias funções podem ser definidas no método dos elementos, sendo a mais rudimentar o espaço nodal;

Jacobian: define o método Jacobiano. Que pode ser referenciado nos objetos *Formulation* e *PostProcessing* que são utilizados no cálculo dos termos de integral, permitindo assim vários métodos de transformação como por exemplo a axissimétrica;

Integration: define o método da integração. Podem ser escolhidos diferentes métodos de integração. Um método muito utilizado é o de Gauss;

Formulation: construção das equações. Permite trabalhar com integrais de superfícies, volumes e integrais de linha com muitos tipos de densidade;

Resolution: solução das equações. Define todas as operações que são realizadas nas equações de uma determinada formulação, incluindo geração e solução de um sistema linear entre outros;

Post-Processing: explora a solução das equações. É baseado na solução da formulação, possibilitando a formulação e construção de uma quantidade de dados úteis para o programa;

Post-Operation: Exporta os resultados obtidos. É nesta etapa que existe uma interação com o programa Gmsh fornecendo diversas possibilidades para a exibição de resultados em vários formatos de arquivos, como por exemplo, cartas de campo, linhas equipotenciais, densidade do campo elétrico, entre outros.

Nesta dissertação, foi utilizado o arquivo “EleSta_v” desenvolvido pelo GRUCAD e que, gentilmente, foi fornecido para os estudos relacionados a este trabalho. Este arquivo de resolução de problemas eletrostáticos pode ser visualizado no Anexo G.

Na etapa de pós-processamento, é possível obter:

Bullets de campo do potencial elétrico: apresenta distribuição do potencial elétrico e distribuição das linhas equipotenciais;

Bullets de campo da distribuição do campo elétrico;

Bullets de campo da distribuição da densidade de fluxo elétrico;

Gráfico do potencial elétrico em uma determinada região;

Gráfico do campo elétrico em uma determinada região.

Neste trabalho, foi analisado o comportamento do campo elétrico em uma determinada região. Assim, foi utilizado o recurso do gráfico do campo elétrico.

5.2. Modelagem Matemática

O objetivo desta etapa do trabalho é a determinação de um modelo matemático que seja capaz de representar a influência das dimensões do anel anti-corona no campo elétrico do isolador. Assim, foram estudadas várias famílias de funções, buscando a que melhor representa essa influência.

Neste trabalho, foi adotada uma modelagem matemática do tipo caixa-preta, pois nenhum modelo prévio era conhecido. Nesse tipo de modelagem, o modelo é determinado através de um processo denominado de identificação de sistemas, constituído por cinco etapas:

- Coleta de dados;
- Escolha do tipo de modelo;
- Escolha da estrutura do modelo;
- Estimação de parâmetros;
- Validação do modelo (AGUIRRE, 2007).

A coleta de dados foi realizada, utilizando os dados obtidos através das simulações. Nesta etapa, foram coletados os valores da intensidade do campo elétrico para cada família de simulações, sendo que uma família de simulação corresponde, neste trabalho, ao estudo da influência de cada diâmetro do tubo circular do anel anti-corona sobre o campo elétrico no isolador. O valor máximo da intensidade do campo elétrico no isolador corresponde ao instante em que o 1º e o 2º picos apresentam a mesma intensidade de campo elétrico, conforme Figura 70.

Com as simulações, foi possível obter uma tabela contendo a intensidade máxima do campo elétrico para os diâmetros do anel anti-corona variando no intervalo de 1,0 cm a 41,0 cm, sendo que a simulação ocorre para cada um dos valores ímpares inteiros deste intervalo. Após a obtenção desta tabela, os dados

foram divididos em duas partes: uma que foi utilizada para a determinação do modelo matemático e outra parte que foi utilizada para a validação deste modelo.

A divisão dos dados de identificação e de validação foi realizada intercalando os dados, sendo o primeiro para identificação, o segundo para validação, o próximo para identificação e assim por diante.

A análise foi realizada restringindo os modelos matemáticos propostos aos modelos de curvas linear, exponencial, logarítmica, polinomial de ordem 2, 3, 4, 5, 6 e potência, conforme detalhado a seguir, estes modelos foram abordados por apresentarem funções que podem representar o comportamento do campo elétrico no isolador.

A função Linear possui uma constante de proporcionalidade do valor de $f(x)$ mediante a variação de “ x ”, tendo a forma $f(x) = ax + b$;

A função Exponencial possui a incógnita no expoente, fazendo com que a curva cresça ou decresça rapidamente, tendo a forma $f(x) = e^x + k$;

A função Logarítmica é utilizada para resolver soluções cujos expoentes são desconhecidos. Esta função possui derivadas simples, tendo a forma $f(x) = \log_a(x) + k$;

A função Polinomial de ordem 2 possui a forma $f(x) = ax^2+bx+c$, onde a , b e c são números reais diferentes de 0;

A função Polinomial de ordem 3 possui a forma $f(x) = ax^3+bx^2+cx+d$, onde a , b , c e d são números reais diferentes de 0;

A função Polinomial de ordem 4 possui a forma $f(x) = ax^4+bx^3+cx^2+dx+e$, onde a , b , c , d , e e são números reais diferentes de 0;

A função Polinomial de ordem 5 possui a forma $f(x) = ax^5+bx^4+cx^3+dx^2+ex+f$, onde a , b , c , d , e , f são números reais diferentes de 0;

A função Polinomial de ordem 6 possui a forma $f(x) = ax^6+bx^5+cx^4+dx^3+ex^2+fx+g$, onde a, b, c, d, e, f, g são números reais diferentes de 0;

A função Potência possui a forma $f(x)=x^n$, onde n é um número natural.

Para análise das funções foram utilizados os programas Excel (versão 2010) e Scilab 5.3.2.

Neste trabalho, a estimação de parâmetros foi realizada, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), bastante difundido na literatura (CAIRES e ALMEIDA, 2012).

Para validar o modelo proposto e para determinar qual dos modelos é mais adequado para representar o problema em análise, foi utilizado o resíduo médio quadrático (RMQ) e uma métrica de porcentagem.

A equação (62) demonstra o cálculo utilizado no RMQ.

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n} \quad (62)$$

Onde:

E_m é a média do resíduo quadrático;

Y_i é o valor de saída medido (intensidade do campo elétrico);

\hat{Y}_i é o valor de saída estimado (intensidade do campo elétrico);

n é o número de amostras.

O método da porcentagem utilizado neste trabalho consiste em verificar a variação do valor estimado com relação ao valor medido (obtido a partir da simulação) em termos de porcentagem. Foi realizada a média do módulo da porcentagem, conforme cálculo demonstrado na equação (63).

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \left(\frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i} \times 100 \right) \right|}{n} \quad (63)$$

Onde:

P_m é a média da porcentagem;

Y_i é o valor da intensidade do campo elétrico medido;

\hat{Y}_i é o valor da intensidade do campo elétrico estimado;

n é o número de amostras.

Após a obtenção dos resíduos com o RMQ e com a porcentagem, foi realizada uma comparação entre estes dois métodos para, então, determinar, dentre os modelos analisados, qual o que melhor representa a influência do diâmetro do anel anti-corona no campo elétrico do isolador. Esta comparação teve a origem do princípio que se a porcentagem dos valores mais altos apresenta um valor agregado muito mais alto no RMQ, com isto quanto mais próximo dos valores originais estes dois métodos devem apresentar o mesmo resultado, convergindo para a função que melhor represente os dados de origem. Para curvas com pequena diferença entre os pontos máximos e mínimos esta comparação não é necessária, entretanto, quando utiliza-se variações grande, 1% do valor mais alto é maior que o próprio menor valor desta curva.

Para cada função estudada, será apresentada, no Capítulo 6, uma tabela contendo o campo elétrico estimado com os dados de identificação, obtidos através da função estudada, o RMQ e a porcentagem. Em seguida, será apresentado um gráfico no qual será possível observar o comparativo entre os dados de identificação e a função. Após isto, será apresentada a validação da função, onde uma tabela contém o valor do campo elétrico estimado, o RMQ e a porcentagem. O gráfico seguinte apresentará um comparativo entre os dados de validação e a curva da função.

No final desta etapa, haverá um quadro priorizando os valores mínimos do RMQ e o valor mínimo da Porcentagem.

5.3. Ensaios Laboratoriais

Os ensaios foram realizados no laboratório de alta tensão “Engenheiro Gino Balestro”, pertencente à Indústria Eletromecânica Balestro Ltda, situada na cidade de Mogi Mirim, interior de São Paulo.

Neste experimento, foi aplicada a tensão fase-terra (289 kV) do sistema de tensão da classe de 500 kV, simulando, assim, sua operação no sistema. Posteriormente, foi realizada uma transmissão de dados, que tinha por objetivo verificar uma possível interferência em sinais de comunicação, na faixa de frequência de 915 MHz, decorrente do campo elétrico gerado no terminal fase do isolador.

O circuito de ensaios de aplicação de tensão é mostrado na Figura 76.

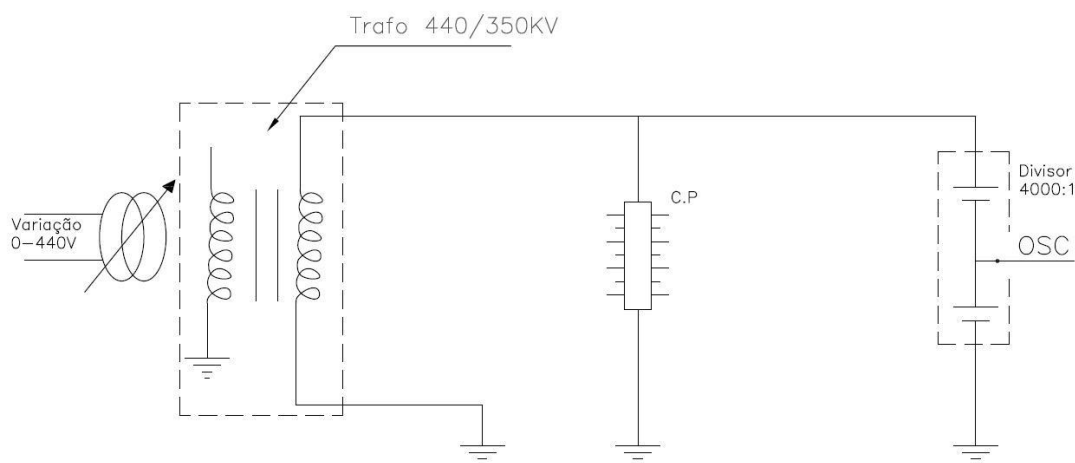


Figura 76. Circuito de ensaio

A transmissão de dados foi realizada em duas etapas:

1. Transmissão de dados estudando a variação da portadora
2. Transmissão de dados estudando a RSSI e pacotes de dados

Para isto, foram utilizados transmissor/receptor RF (“Rádio Frequência”), analisador de espectro, antenas, e os *softwares* Docklight, Python e Excel.

5.3.1. Transmissor/receptor RF

Os transmissores e os receptores utilizados neste projeto foram sensores RFBee, conforme Figura 77.



Figura 77. Sensor RFBee (SEED WIKI, 2012)

Esses sensores possuem alcance de 50 m para ambientes indoor / urbana, chegando a uma distância de 120 m para ambiente exterior com linha de visada. A sensibilidade do receptor é de -95 dBm, trabalhando numa taxa de transmissão de dados de 4.800 bps ou 76.800 bps. É possível utilizar a faixa de frequência de 868 MHz e 915 MHz. Sua potência de transmissão pode ser ajustada de -30 dBm a 10 dBm. Com estes sensores, é possível implementar redes para comunicação ponto a ponto ou ponto-multiponto. Tendo um máximo de 256 sensores em uma mesma rede, a identificação dos nomes dos sensores pode variar de 0 a 255.

O RFBee é baseado no microprocessador Atmel ATmega168 rodando a 8 MHz (frequência do processador). Possui fácil interface serial e 9 portas de entradas e saídas que podem ser programáveis. Seu *hardware* e *software* são abertos (RADIOIT STORE, 2012). Sua tensão de alimentação varia de 3,0VDC a 3,6VDC, sendo o valor típico de 3,3VDC. Sua corrente na transmissão é de 34,5 mA, na recepção é de 18,1 mA, em idle é de 5,2 mA e de *power-down* é menor que 1 μ A. Sua temperatura de trabalho varia de -50°C a 125°C (SEED STUDIO WORKS, 2010). O sensor RFBee tem suporte à plataforma Arduino.

5.3.1.1. Arduino

O Arduino é uma plataforma de software e *hardware* livre que teve origem na Itália no ano de 2005 (SILVA, 2011) e possuía o intuito inicial de controlar dispositivos e protótipos de maneira simplificada, utilizando para isto uma plataforma eletrônica que é composta de entradas e saídas e um microcontrolador que pode ser programado utilizando linguagem de programação Arduino. A linguagem de programação do Arduino é baseada na linguagem C/C++ e é uma implementação do *Wiring*, baseada no ambiente de programação *Processing*. A plataforma Arduino é mostrado na Figura 78.

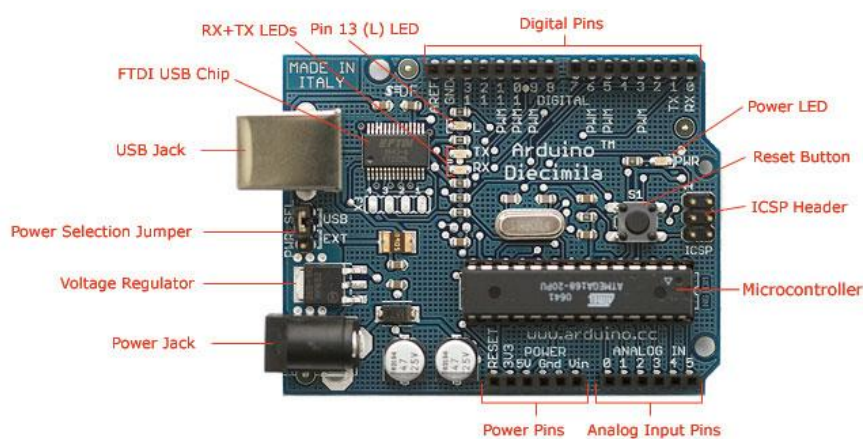


Figura 78. Plataforma Arduino (ARDUINO, 2012)

A plataforma Arduino possui 14 pinos de entrada e saída digitais e 06 pinos de entradas analógicas, podendo ser utilizado para controlar diversos tipos de dispositivos. Ele também possui comunicação USB para comunicação com computador, que pode ser utilizada para programar e também pode ser utilizada para inserir entradas para a plataforma. As entradas digitais operam com 5 Volts, podendo fornecer ou receber no máximo 40 mA, possuindo um resistor pull-up interno de 20 a 50 k Ω (ARDUINO, 2012). Diversos códigos para as mais variadas aplicações utilizando esta plataforma podem ser obtidos na Internet, além de diversos fóruns para discussão (ENGENHEIRANDO.COM, 2011).

5.3.2. Analisador de espectros

O analisador de espectros é um aparelho eletrônico que possui a finalidade de realizar análise de sinais alternados no domínio da frequência, sendo assim possível conhecer suas componentes harmônicas. Este aparelho indica a informação contida em um sinal de forma direta, como tensão, potência e frequência (BONFIM, 2003).

Foi utilizado, neste trabalho, o analisador de espectros portátil RF Explorer, conforme Figura 79.



Figura 79. Analisador de Espectro RF Explorer (RF EXPLORER, 2012)

Este analisador de espectro possui a sua frequência centrada em 915 MHz com 10 MHz de banda total. Assim, é possível utilizar este analisador para medir sinais de 910 MHz até 920 MHz. Também é possível realizar comunicação diretamente com o computador utilizando sua por mini USB, sendo possível interliga-lo com o programa RF Explorer Windows Client realizando aquisições e salvando em arquivos em formato *.CSV, dando a possibilidade de manipular os dados aquisitados (RF EXPLORER, 2012).

5.3.3. Antenas

As primeiras antenas foram criadas por Heinrich Hertz em 1886 e tinham a finalidade de auxiliar o estudo das teorias eletromagnéticas de Maxwell (LEITHOLD, 2012).

É um dispositivo que possui a função de transmitir ou receber ondas eletromagnéticas. Na transmissão, as antenas transformam energia eletromagnética em energia irradiada, transformando, portanto elétrons em fótons e na recepção as antenas transformam energia irradiada em energia eletromagnética, convertendo fótons em elétrons (BALANIS, 2009).

Existe uma relação entre o comprimento de onda eletromagnética e o tamanho da antena. E quanto maior a frequência utilizada na antena, maior será a precisão dos dispositivos, equipamentos e medições (LEITHOLD, 2012).

A Fórmula de Friis descreve a relação entre a potência de emissão e a de recepção, conforme equação (64).

$$P_R = (P_T G_T) \chi G_R \chi \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \right) \quad (64)$$

Onde:

P_R é a potência de recepção

P_T é a potência de transmissão

G_T é o ganho da antena transmissora

G_R é o ganho da antena receptora

λ é o comprimento de onda

r é a distância entre as antenas

O termo $\left(\frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \right)$ da equação (64) representa a perda de espaço livre.

A equação (65) também pode ser expressa em dB por:

$$P_{R(dBm)} = P_{T(dBm)} + G_{T(dBi)} + G_{R(dBi)} - 20 \log r_{(km)} - 20 \log f_{(MHz)} - 32,44 \quad (65)$$

Onde:

$$G_T(\text{dBi}) = 10\log(G_T)$$

$$G_R(\text{dBi}) = 10\log(G_R)$$

$$P_T(\text{dBm}) = 10\log(P_T \text{ em Watts} / 10^{-3}) = P_T(\text{dB}) + 30$$

$$P_R(\text{dBm}) = 10\log(P_R \text{ em Watts} / 10^{-3}) = P_R(\text{dB}) + 30$$

f é a frequência em MHz

O ganho da antena é medido em dBi onde a letra i indica o sinal máximo da antena comparada com o sinal de uma antena isotrópica coloca no mesmo lugar. A antena isotrópica irradia o sinal em todas as direções e é utilizada como referência para as demais antenas, com isto o valor do ganho de uma antena (qualquer) é referenciada à antena isotrópica, ganhando assim a unidade de medida dBi.

Existem vários tipos de antenas como: Hélice, Log-Periódicas, Yagi-Uda, Corneta, Painel Dipolos, Painel H (Duplo Delta), Parabólica, Anel, Superturnstile, Slot, Seta, Chicote, Helicoidal, LOOP, Omnidirecionais, Patch, Isotrópica, Dipolo infinitesimal, Direcional, entre outras.

Neste trabalho, foram utilizadas antenas direcionais e antenas omnidirecionais. As antenas omnidirecionais foram utilizadas para simular a condição da utilização de sensores nas redes de transmissão, enquanto que a antena direcional foi utilizada para estudar uma possível interferência do campo elétrico na frequência de comunicação de 915 MHz.

5.3.3.1. Antena direcional

A antena direcional tem como característica irradiar ou receber ondas eletromagnéticas de forma mais eficiente em uma determinada direção, proporcionando mais qualidade e intensidade do sinal, obtendo assim maior potência e alcance. A direção de irradiação encontra-se em uma pequena região na horizontal e na vertical, conseguindo assim maior potência e alcance, pois a concentração do sinal fica restrita nesta região.

Neste experimento, foram utilizadas as antenas Yagi direcional, modelos PQAC-8020 e PQAC-9017, ambas fabricadas pela empresa ProEletronic (PROELETRONIC, 2012).

5.3.3.1.1. Antena Yagi direcional, modelo PQAC-8020

Dentre várias utilidades desta antena, segundo o fabricante, é adequada na utilização para longas distâncias, para *links* de internet, monitoramento de sistemas de segurança e *links* sem fio de dados. Esta antena possui um ganho de 20 dBi, relação frente-costa >20 dB, ângulo de abertura 22°, impedância de 50 Ω e V.S.W.R. (“*Voltage Standing Wave Ratio*”) de <1,5:1 (PROELETRONIC, 2012). A V.S.W.R. indica a quantidade de sinal refletida que volta ao transmissor durante a transmissão.

É uma antena fabricada de alumínio com pintura epóxi eletrostática e possui excelente diretividade e excelente relação frente-costa. A Figura 80 ilustra a antena utilizada no experimento.



Figura 80. Antena direcional modelo PQAC-8020 (PROELETRONIC, 2012)

5.3.3.1.2. Antena Yagi direcional, modelo PQAC-9017

Esta antena é similar à apresentada anteriormente. Entretanto, possui um ganho de 17 dBi, relação frente-costa >18 dB, ângulo de abertura 32°, impedância de 50 Ω e V.S.W.R. de <2,0:1, possuindo o diagrama de irradiação apresentado na Figura 81. A Figura 82 apresenta a antena utilizada no experimento.

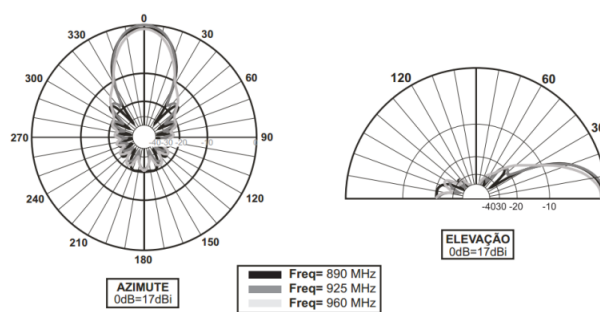


Figura 81. Diagrama de irradiação da antena PQAC-9017 (PROELETRONIC, 2008)



Figura 82. antena utilizada no experimento (PROELETRONIC, 2008)

5.3.3.2. Antena omnidirecional

As antenas omnidirecionais possuem como características a irradiação de sinais em todas as direções no plano horizontal e em uma restrita área na vertical. No plano horizontal, possui uma radiação de 360° , enquanto que na vertical este ângulo pode ser de 10° , sendo esta a grande diferença entre esta antena e a antena isotrópica, que irradia o sinal em todos os sentidos.

Neste experimento, foi utilizada a antena omnidirecional mostrada na Figura 83.



Figura 83. Antena omnidirecional utilizada no experimento.

Esta antena possui como características uma V.S.W.R. $\leq 3,0$ e uma impedância de 50Ω .

5.3.4. Software Docklight

O *software* Docklight foi desenvolvido pela Flachmann & Heggelbaier (FLACHMANN e HEGGELBACHER, 2012) e é um programa que possibilita ao usuário realizar testes automatizados para diversos protocolos de comunicação serial via COM, como por exemplo: RS232, RS422, RS485 e *Bluetooth*, TCP (*Transmission Control Protocol* / *Protocolo de Controle de Transmissão*) e UDP (*User Datagram Protocol* / *Protocolo de Datagramas do Usuário*).

Com este programa, é possível realizar funções de comunicação, simulando protocolos reais, enviando dados pré-determinados e/ou detectando uma sequência específica de dados, incorporando-as no próprio código de teste (FLACHMANN & HEGGELBACHER, 2012). Os dados de comunicação podem ser registrados em formato de texto ou em formato HTML (*HyperText Markup Language* - Linguagem de Marcação de Hipertexto). O programa Docklight utiliza as portas COM de comunicação que o computador fornece em seu sistema operacional, sendo possível instalá-lo em Windows 7, Windows Vista, Windows XP ou Windows 2000/NT.

Neste trabalho, este *software* foi utilizado na sua forma de avaliação (gratuita) que pode ser baixada em (FLACHMANN & HEGGELBACHER, 2012) para enviar uma sequência de dados sobre a portadora de 915 MHz. A sequência de dados é apresentada na Figura 84.

2 - Sequence														Edit Mode		<input type="radio"/> ASCII		<input type="radio"/> HEX		<input checked="" type="radio"/> Decimal		<input type="radio"/> Binary		Pos. 1 / 52	
000	000	000	000	000	000	000	000	005	000	001	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000			
000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000			
000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	001	000	000	001	000	000	000	000	000	000	000	000			
000	000	000	000																						

Figura 84. Sequência de dados enviadas pelo programa Docklight

5.3.5. Software Python

O Python foi desenvolvido em 1990 por Guido van Rossum na Holanda (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 1990) e é um programa livre e pode ser obtido em (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2012). É um programa dinâmico, orientado a diversas aplicações, possui uma linguagem de programação simples de entender, sua sintaxe é clara e de fácil aprendizagem. Existem abstrações de alto nível, por isto, um programa desenvolvido em Python, será menor que um escrito em outra linguagem de programação. Por ser um programa livre, existe uma grande troca de informações em fóruns e na Internet sobre bibliotecas e particularidades do mesmo.

É possível, através desta linguagem, implementar qualquer tipo de programa, sendo possível utilizar gráficos, funções matemáticas e utilização de banco de dados SQL. Também é possível escrever extensões em linguagem C e C++.

Outra particularidade deste programa é a possibilidade da utilização em múltiplas plataformas, sem a necessidade de alterar seu código. Para isto, basta ter instalado o interpretador Python (ASYNC, 2004). Outra grande vantagem do

Python é o mesmo ser interpretado, não sendo preciso compilar o seu código. Este recurso aumenta a velocidade de programação (SOFTONIC INTERNATIONAL, 2012).

Neste trabalho, foi utilizado um programa desenvolvido em Python com a capacidade de medir a RSSI da antena transmissora e da antena receptora. Também foi realizada a medida do número de pacotes perdidos, podendo assim medir a PER ("*Packet Error Rate*" – Erro nos pacotes recebidos).

O programa utilizado neste experimento é apresentado no Anexo H e foi desenvolvido por Montali (ASSUMPÇÃO, 2011).

5.3.6. Transmissão de dados estudando a variação da portadora

Nesta etapa do experimento, foi estudado se existe uma variação (flutuação) da portadora quando a mesma atravessa o campo elétrico proveniente do terminal fase do isolador. A portadora estava centrada em 915 MHz.

A sequência de dados da Figura 84 foi transmitida através de um transmissor RF, na frequência de 915 MHz e, através de um analisador de espectro, foi observado se ocorre variação da portadora quando o sinal passa pelo campo elétrico gerado pelo terminal fase do isolador.

As informações foram transmitidas a cada 0,5 segundos e foi observada uma possível variação da frequência central da portadora, utilizando quatro níveis de campo elétrico no terminal fase, sendo:

1 – isolador sem anel anti-corona, conforme Figura 85, sem aplicação de tensão;

2 – isolador sem anel anti-corona, conforme Figura 85, com aplicação de tensão;

3 – isolador com anel anti-corona com diâmetro do anel condutor de 1,5 cm, conforme Figura 86, com aplicação de tensão;

4 – isolador com anel anti-corona com diâmetro do anel condutor de 7,0 cm conforme Figura 87, com aplicação de tensão.

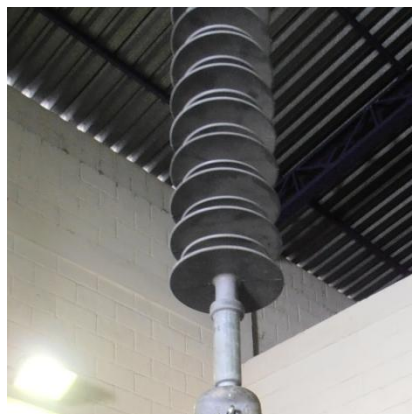


Figura 85. Isolador no experimento, sem anel anti-corona



Figura 86. Isolador no experimento, com anel anti-corona de diâmetro do condutor de 1,5 cm



Figura 87. Isolador no experimento, com anel anti-corona de diâmetro do condutor de 7,0 cm

Em todos os ensaios, a medição ocorreu durante 5 minutos.

O transmissor RF e a antena estavam a 6 metros do isolador. O analisador estava a 8 metros do isolador, fazendo um ângulo de 180° com a antena, conforme Figura 88.

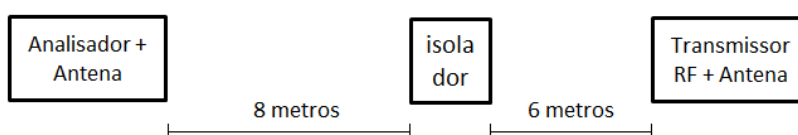


Figura 88. Posicionamento do experimento

Foi realizado o experimento com a antena omnidirecional simulando assim a condição do sensor em uma linha de transmissão. Posteriormente, a antena omnidirecional foi substituída por uma antena direcional na qual sua diretividade estava na direção de maior intensidade do campo elétrico no isolador. Esta etapa tinha o objetivo de verificar se o campo elétrico proveniente do terminal fase do isolador causa interferência na portadora de 915 MHz.

5.3.7. Transmissão de dados estudando a RSSI e pacotes perdidos

Nesta etapa do experimento, foi implementada uma rede com dois sensores, na qual um será identificado como base e o outro como sensor 1.

Através do *software* Python, foi enviada uma sequência de dados através de um pacote, no qual está sendo transportada a informação do número do pacote. Este valor é útil para verificar quantos pacotes foram perdidos na transmissão.

O *software* Python enviava via USB esses dados para um transmissor RF que estava acoplado a uma antena. Este sensor, denominado base, estava a 6 metros do isolador. A 8 metros do isolador, fazendo um ângulo de 180° com o sensor base, estava o sensor 1, conforme Figura 89. Este sensor 1, recebia a informação e retransmitia o pacote até o sensor base. O sensor base, através do programa Python verificava se o pacote chegou íntegro e media RSSI do sensor base e do sensor 1, além de contar o número de pacotes perdidos e/ou corrompidos.

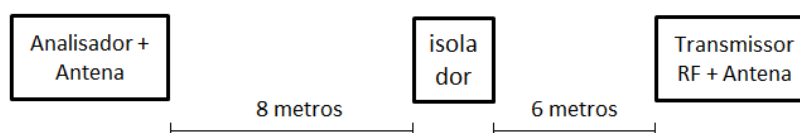


Figura 89. Posicionamento do experimento

Este experimento foi realizado, considerando quatro níveis de intensidade de campo elétrico provenientes do terminal fase do isolador, sendo:

1 – isolador sem anel anti-corona, conforme Figura 85, sem aplicação de tensão;

2 – isolador sem anel anti-corona, conforme Figura 85, com aplicação de tensão;

3 – isolador com anel anti-corona com diâmetro do anel condutor de 1,5 cm, conforme Figura 86, com aplicação de tensão;

4 – isolador com anel anti-corona com diâmetro do anel condutor de 7,0 cm conforme Figura 87, com aplicação de tensão;

Nas simulações, a medição ocorreu durante o envio de 250 pacotes, sendo que cada pacote de informações foi enviado a cada 1 segundo.

Estes dados foram salvos em um arquivo *.TXT e serão, após a realização dos experimentos, transportados para o *software* Excel para que fosse possível realizar as análises do RSSI e PER.

Foi realizado o experimento com a antena omnidirecional simulando assim a condição do sensor em uma linha de transmissão, transportando uma possível informação que pode ser de corrente de fuga do isolador, número de descargas, nível de poluição, de acordo com a necessidade do sistema, considerando o conceito de *smart grid*, citado anteriormente.

Após esta etapa do experimento, a antena omnidirecional foi substituída por uma antena direcional, sendo que sua diretividade estava na direção de maior intensidade do campo elétrico no isolador. Esta etapa tinha o objetivo de verificar se o campo elétrico proveniente do terminal fase do isolador causa degradação do sinal e da informação utilizando a portadora de 915 MHz.

Os resultados de todos os testes, simulações e ensaios realizados encontram-se descritos no Capítulo 6.

6. RESULTADOS

6.1. Resultados da Simulação

Utilizando o código descrito no Anexo F, foi possível obter o *script* do desenho do isolador. Este *script* encontra-se no Anexo I. Salvando este *script* com extensão *.geo, é possível abri-lo no programa Gmsh, onde foi apresentada a geometria do isolador, conforme Figuras 90 a 93.

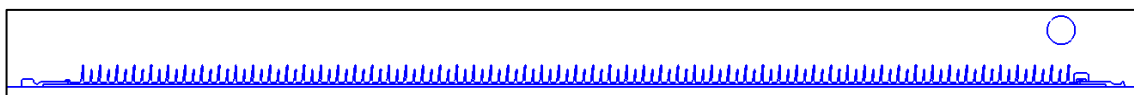


Figura 90. Desenho do isolador no Gmsh

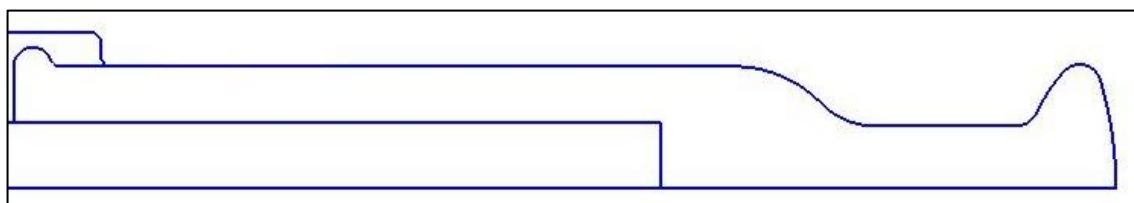


Figura 91. Detalhe do terminal bola do isolador

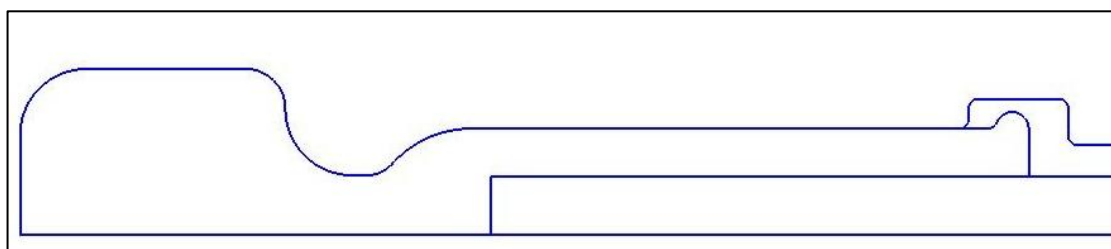


Figura 92. Detalhe do terminal concha do isolador

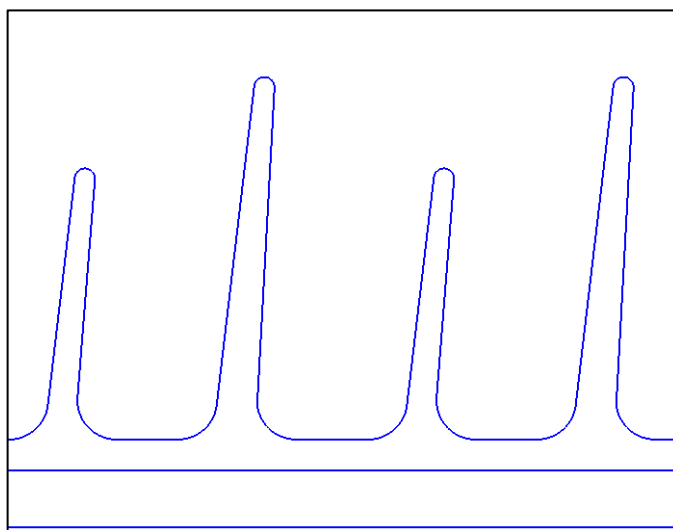


Figura 93. Detalhe das aletas do isolador

Após o desenho do isolador, foi delimitada a superfície de estudo, através de dois meio círculos que podem ser visualizados na Figura 94. Este limite de superfície restringe a resolução para dentro desta área, sendo que fora desta área, o *software* de simulação considera o ambiente como vácuo. A superfície dentro destes círculos representa, fisicamente, a região de ar do ambiente em torno deste objeto sob estudo.

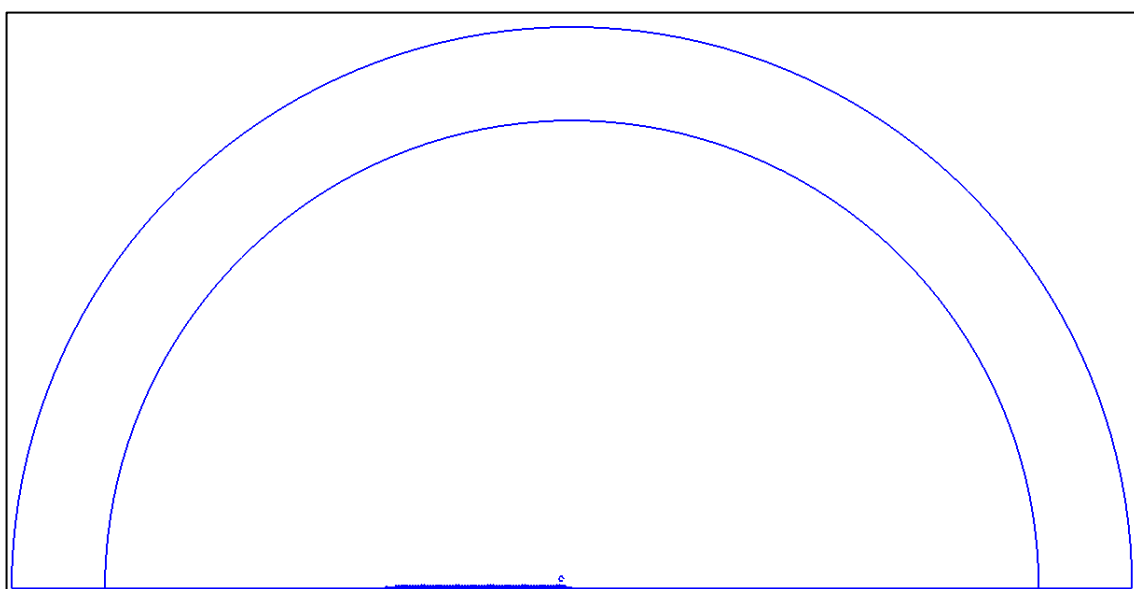


Figura 94. Objeto de estudo com o limite de superfície

Após restringir a superfície de estudo, foram aplicadas as propriedades físicas do isolador (materiais que constituem cada um dos componentes do isolador), conforme pode ser observado nas Figuras 95 a 99.

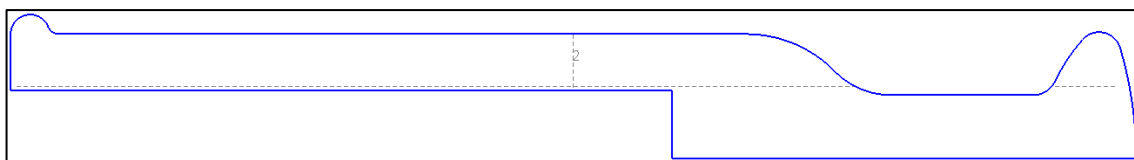


Figura 95. Terminal bola, fabricado em aço

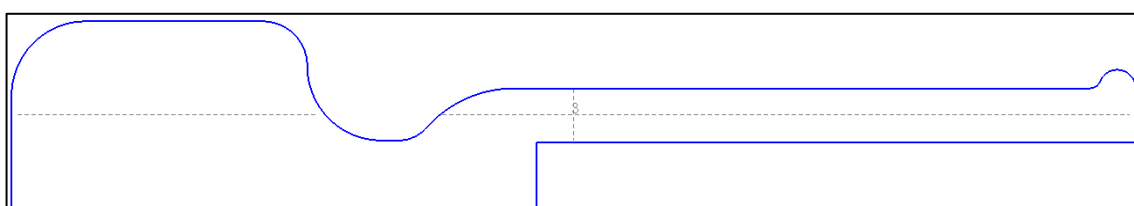


Figura 96. Terminal concha, fabricado em aço

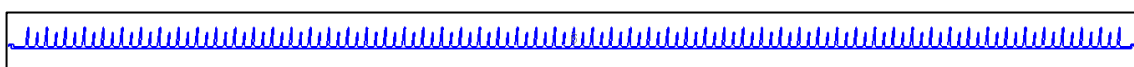


Figura 97. Aletas do isolador, fabricadas em silicone

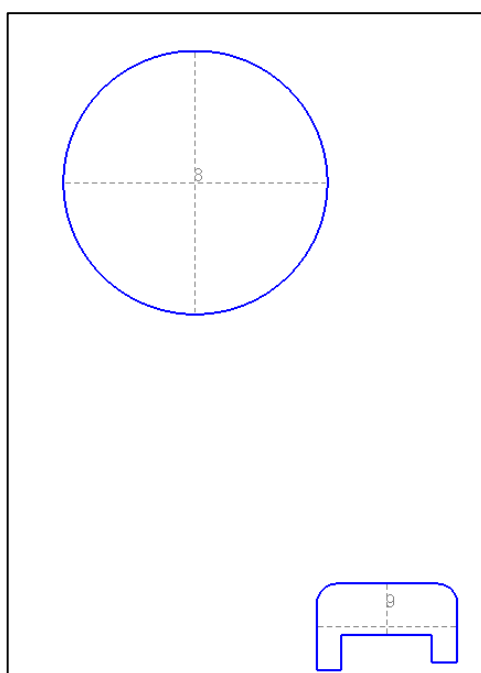


Figura 98. Anel anti-corona, fabricado em alumínio

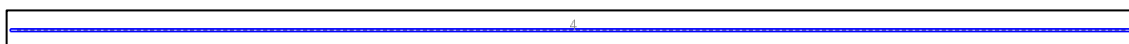


Figura 99. Tarugo pultrudado, fabricado em fibra de vidro

Estas regiões são vinculadas com o *solver* através das linhas de comando, conforme mostrado na Figura 100.

```

arinf    = Region[100];
aco      = Region[101];
tartugo  = Region[102];
ar       = Region[103];
silicone = Region[104];
aluminio = Region[105];

```

Figura 100. Definições das propriedades físicas no solver

Após a definição das propriedades físicas, foram inseridos os potenciais elétricos (tensão elétrica) na simulação, na qual é aplicada a tensão de 289 kV no terminal bola e no anel anti-corona e potencial terra (0 V) no terminal concha. As Figura 101 e Figura 102 apresentam os locais da aplicação dos potenciais elétricos.

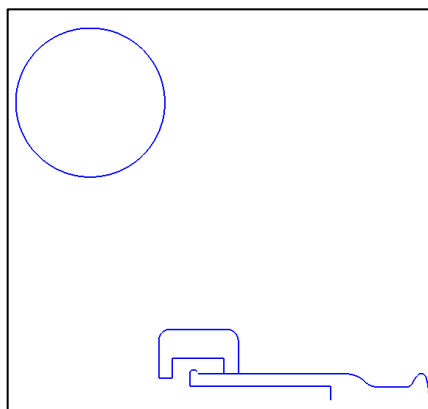


Figura 101. Componentes com aplicação de potencial fase

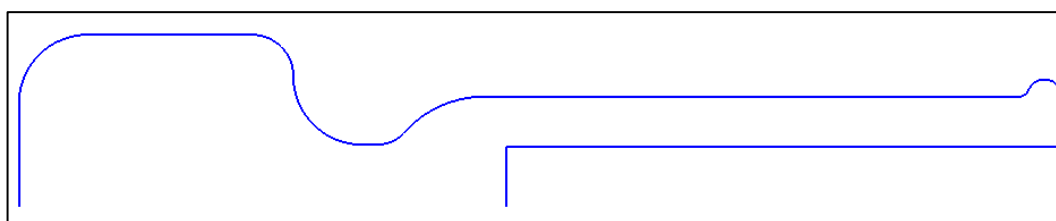


Figura 102. Componente com aplicação de potencial terra

Para a simulação, é necessário gerar as malhas de elementos finitos, tarefa que é feita de forma automática pelo *software*, conforme Figura 103.

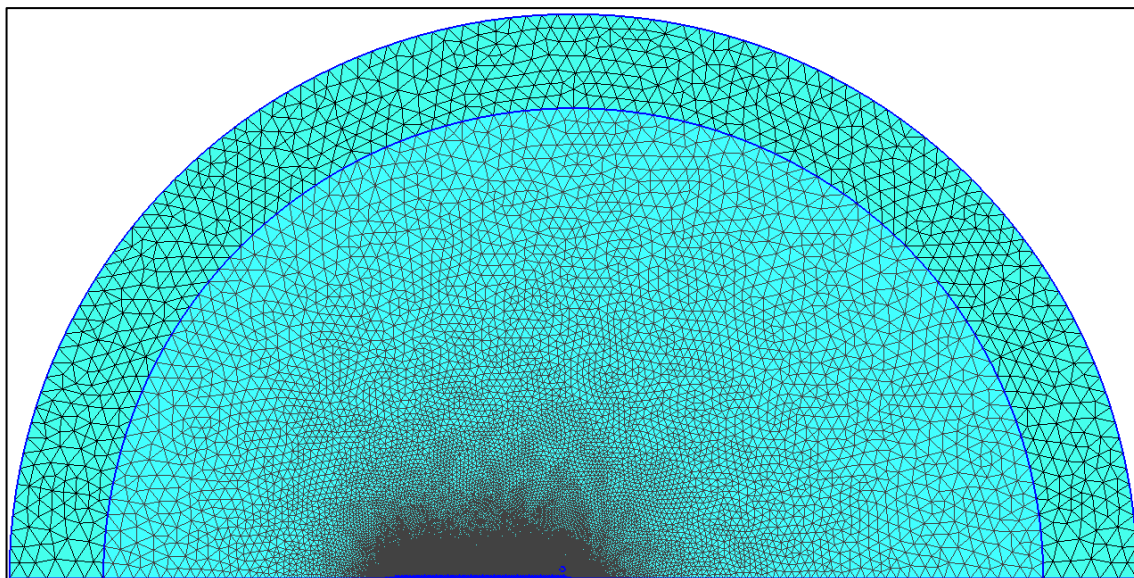


Figura 103. Malha da área sob estudo

Visando a obtenção de resultados mais precisos na área de interesse, foi realizado um refinamento das malhas. A Figura 104 apresenta a malha sem refinamento e a Figura 105 apresenta a malha com refinamento.

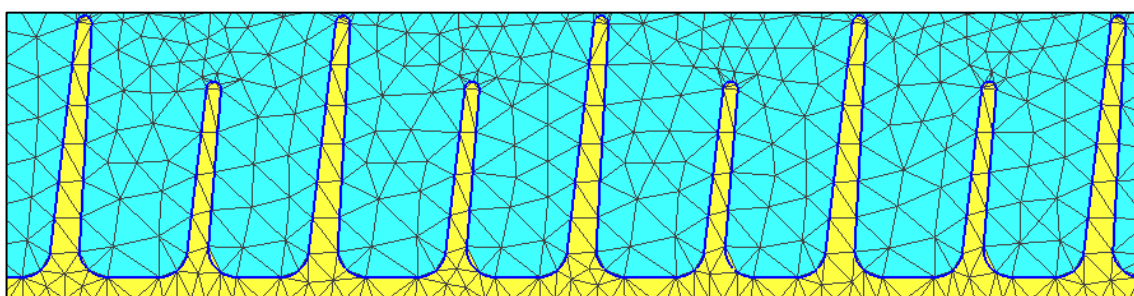


Figura 104. Malha sem refino

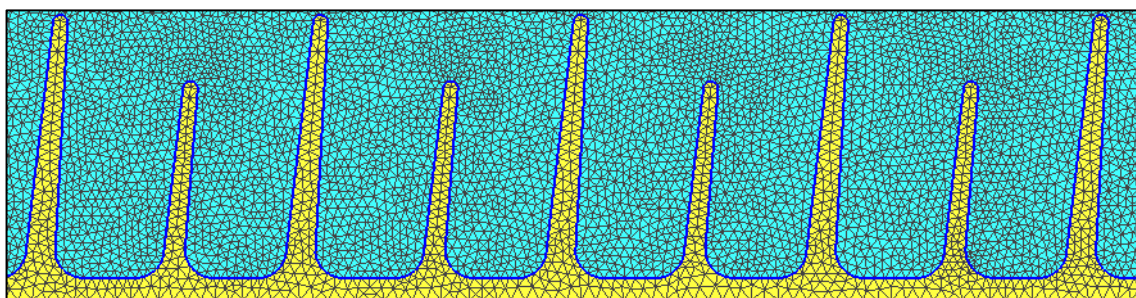


Figura 105. Malha refinada

A geração da malha é salva em um arquivo com extensão *.MSH. Nesta simulação, foram gerados 124.721 elementos triangulares com 59.800 vértices.

Este arquivo foi, então, utilizado pelo *solver* para solucionar o problema através da biblioteca “EleSta_v” que pode ser visualizado no Anexo G. Executando o solver (GetDP), foi possível obter as cartas de campo do potencial elétrico, das linhas equipotenciais, do campo elétrico, da densidade elétrica e os gráficos do potencial elétrico e campo elétrico. As Figuras 106, 107, 108, 109, 110 e 111 apresentam, respectivamente, esses resultados.

Na Figura 106 é possível verificar a concentração do potencial elétrico no terminal fase, no anel anti-corona e nas primeiras aletas do isolador.

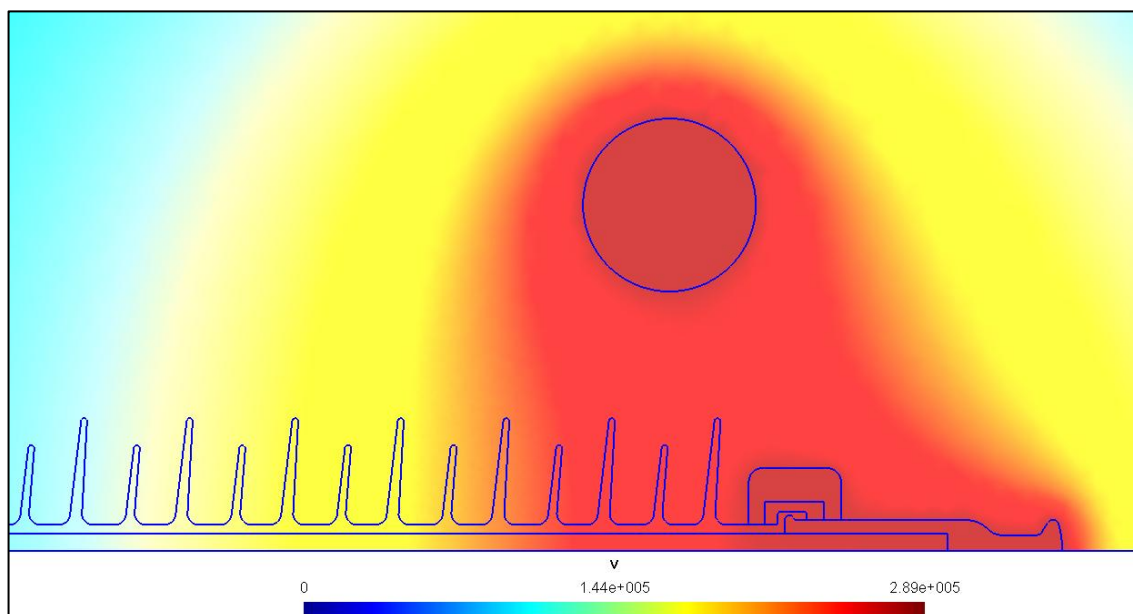


Figura 106. Carta de campo do potencial elétrico

Na Figura 107 é apresentado as linhas equipotenciais, sendo as mesmas com maior densidade no terminal fase do isolador.

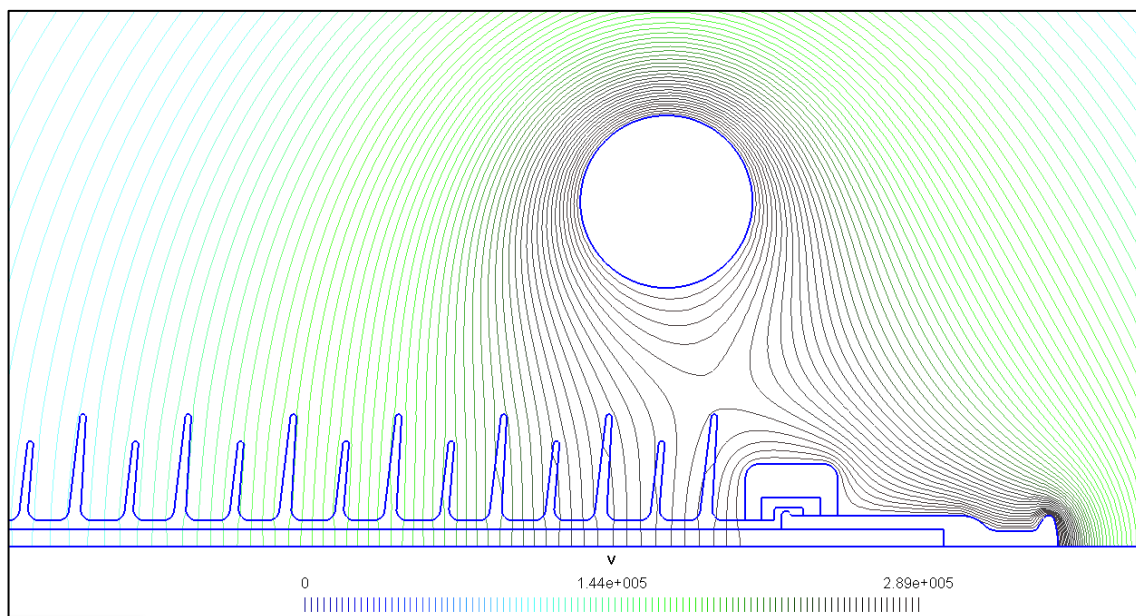


Figura 107. Carta de campo das linhas equipotenciais

Na Figura 108 é possível verificar que a concentração do campo elétrico, sendo que seu ponto máximo é apresentado nas pontas do terminal fase.

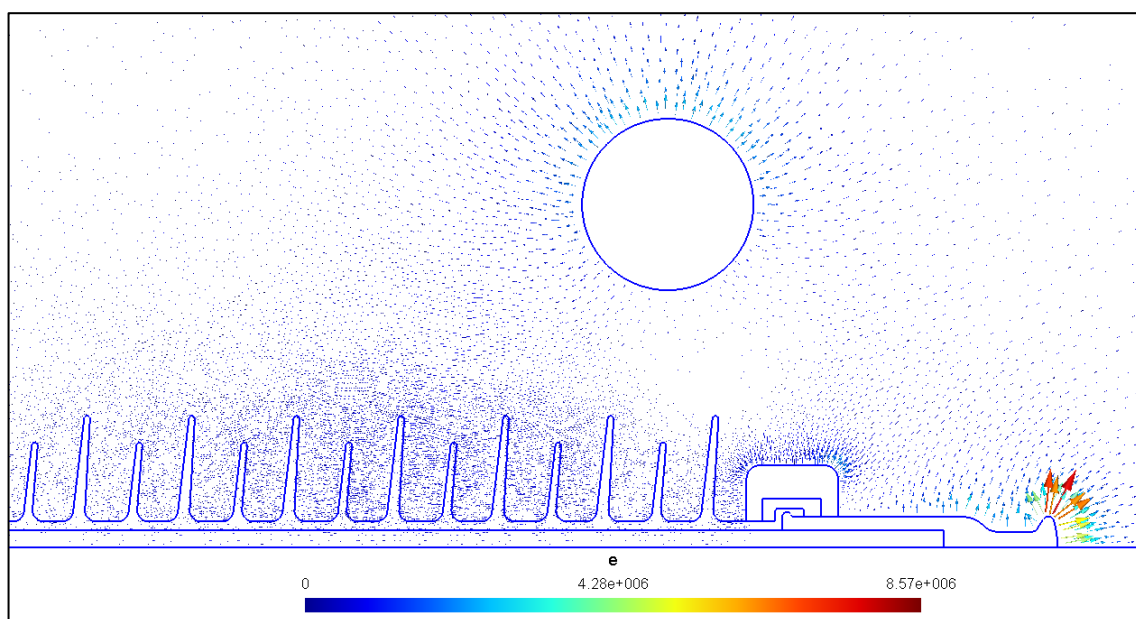


Figura 108. Carta de campo do campo elétrico

Na Figura 109 é apresentado o comportamento da densidade elétrica que representa o caminho que os elétricos tendem a formar em uma formação de trilhamento elétrico.

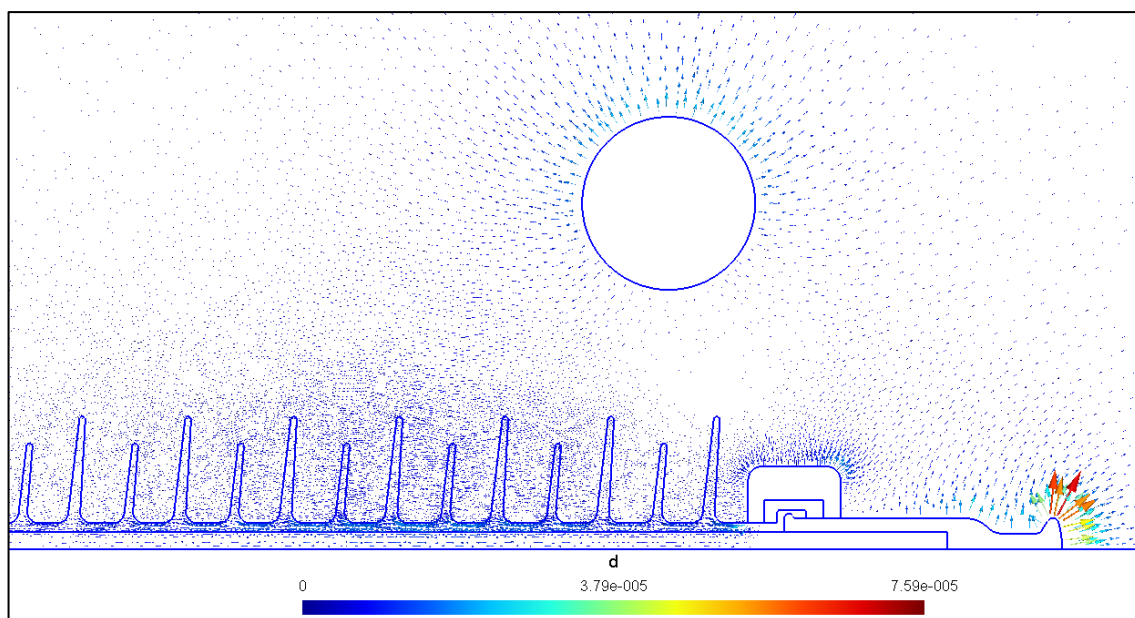


Figura 109. Carta de campo da densidade elétrica

Na Figura 110 é apresentado o potencial elétrico na linha de corte pré-determinada, tendo seu ponto máximo próximo ao terminal fase e caindo conforme se afasta do mesmo.

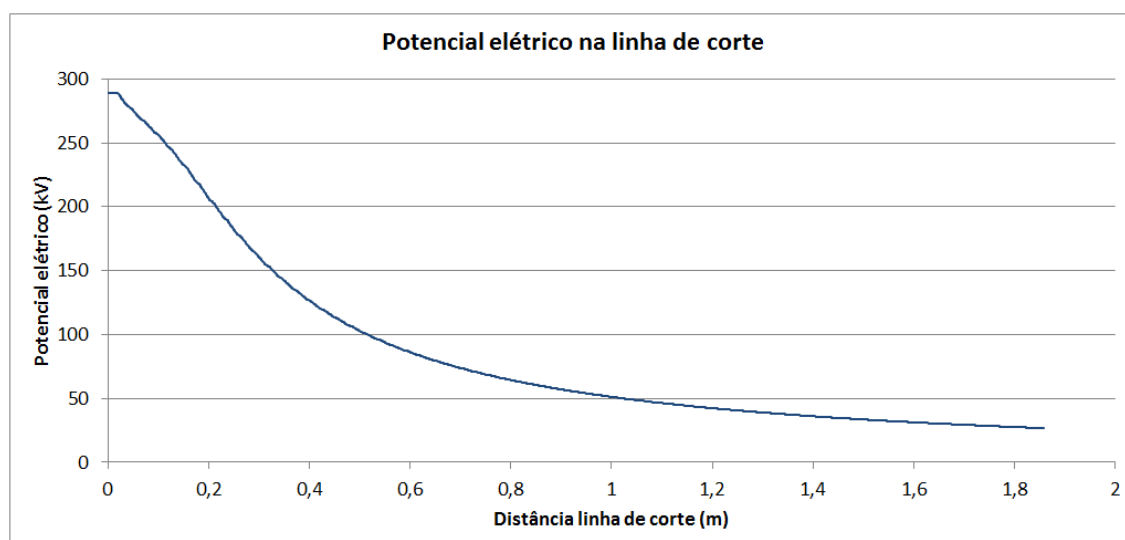


Figura 110. Gráfico do potencial elétrico na linha de corte

Na Figura 111 é possível verificar o comportamento do campo elétrico na linha de corte pré-determinado.

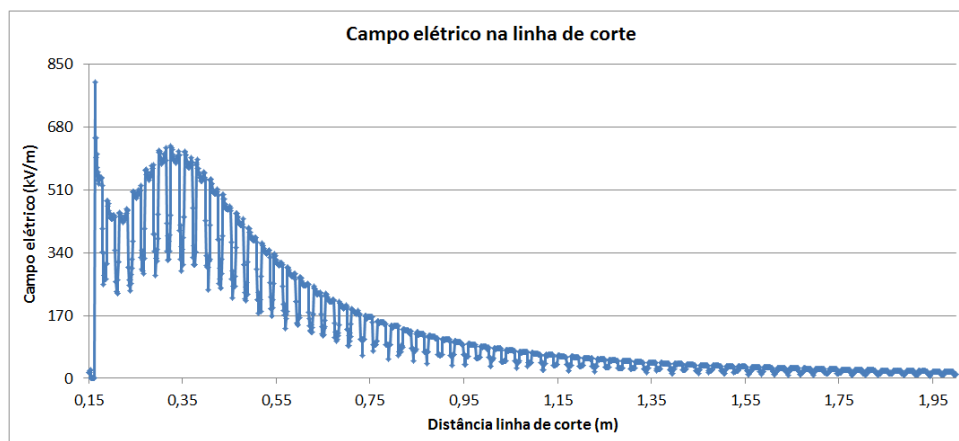


Figura 111. Campo elétrico na linha de corte

Variando a dimensão “r”, que representa a distância do centro do anel anti-corona até o centro do isolador, e anotando os valores máximos dos picos da intensidade do campo elétrico, obtém-se a Tabela 4.

Tabela 4. Valores do campo elétrico (kV/m) para “d” (diâmetro do condutor do anel anti-corona) igual a 1cm

		"d" 1 (cm)													
r (cm) / h (cm)	3		4		5		6		7		8		9		
	1º pico	2º pico	1º pico	2º pico	1º pico	2º pico	1º pico	2º pico	1º pico	2º pico	1º pico	2º pico	1º pico	2º pico	
7,5	2752846	1907571	2390483	1696366	2188928	1535059	2074142	1413558	2049270	1366274	2089069	1332507	2145476	1324564	
8	2788284	1861967	2455906	1664723	2241638	1469195	2128100	1348881	2089143	1294702	2118289	1262259	2196287	1228929	
8,5	2791251	1834090	2497368	1653155	2293479	1449945	2175202	1289761	2129776	1231054	2152326	1197333	2217901	1155229	
9	2792550	1795206	2527645	1630748	2335273	1447201	2218939	1305139	2172384	1185195	2181350	1138934	2236729	1091178	
9,5	2795079	1745944	2552599	1593747	2377829	1461169	2262026	1308653	2208697	1209284	2209477	1134465	2255258	1097511	
10	2791434	1716525	2577063	1596318	2407712	1457163	2301830	1321630	2243927	1231059	2237941	1161054	2275381	1123784	
10,5	2791874	1692678	2593361	1573176	2439172	1442994	-	-	2278042	1239168	-	-	-	-	
11	2790605	1671443	2607296	1552575	2468446	1443422	-	-	2310237	1267444	-	-	-	-	
11,5	2789842	1653221	2620954	1544623	2486258	1451874	-	-	2340663	1283193	-	-	-	-	
12	2785830	1635518	2634807	1551382	2512123	1440216	-	-	2370248	1286453	-	-	-	-	
12,5	2787302	1622423	2645922	1530145	2533764	1456912	-	-	2393500	1309140	-	-	-	-	
13	2786634	1609429	2656365	1524296	2548779	1455698	-	-	2415270	1319153	-	-	-	-	
13,5	2789700	1599780	2666581	1530848	2566721	1444145	-	-	2440852	1328599	-	-	-	-	
14	2790175	1590435	2674660	1528452	2579647	1441788	-	-	2462073	1340171	-	-	-	-	
14,5	2789165	1581168	2684928	1512090	2595696	1458716	-	-	2483097	1347162	-	-	-	-	
15	2790175	1573761	2692847	1508945	2610405	1445661	-	-	2501652	1344257	-	-	-	-	

Na Tabela 4 é possível verificar os picos da intensidade do campo elétrico, para “d” igual a 1 cm (fixo) e variando as demais posições (“r” e “h”, que representa a altura do anel anti-corona).

O valor ótimo da intensidade do campo elétrico será obtido, levando em consideração a menor diferença entre o 1º e 2º pico. Para este caso em

específico o 1º e 2º pico não se interceptaram, sendo assim, foi utilizado o que apresentar a menor diferença entre o 1º e 2º picos. Nos demais casos, a menor diferença é zero, pois ocorre o cruzamento. A Tabela 5 apresenta os valores desta diferença.

Tabela 5. Valores do campo elétrico (kV/m) da diferença do 1º e 2º pico

		"d" 1 (cm)						
r (cm) /		3	4	5	6	7	8	9
h (cm)		diferença	diferença	diferença	diferença	diferença	diferença	diferença
7,5		845275	694117	653868	660583	682996	756562	820912
8		926316	791183	772442	779220	794440	856030	967358
8,5		957161	844213	843534	885441	898721	954993	1062672
9		997343	896898	888072	913800	987189	1042416	1145551
9,5		1049135	958852	916659	953373	999413	1075012	1157747
10		1074908	980745	950549	980200	1012869	1076888	1151598
10,5		1099196	1020186	996178	-	1038874	-	-
11		1119163	1054721	1025024	-	1042794	-	-
11,5		1136621	1076331	1034384	-	1057471	-	-
12		1150312	1083424	1071907	-	1083795	-	-
12,5		1164879	1115777	1076852	-	1084360	-	-
13		1177206	1132069	1093081	-	1096117	-	-
13,5		1189919	1135733	1122576	-	1112253	-	-
14		1199740	1146209	1137859	-	1121903	-	-
14,5		1207998	1172837	1136980	-	1135935	-	-
15		1216414	1183902	1164744	-	1157395	-	-

Na Tabela 5 são apresentados os menores valores da diferença entre os dois picos presentes no gráfico do campo elétrico. Através do menor valor da diferença dos picos do campo elétrico pode-se obter o menor valor do pico do campo elétrico para a dimensão "d" igual a 1 cm, conforme gráfico apresentado na Figura 112. Para este caso, os valores mínimos do campo elétrico foram obtidos para a dimensão "r" igual a 7,5 cm.

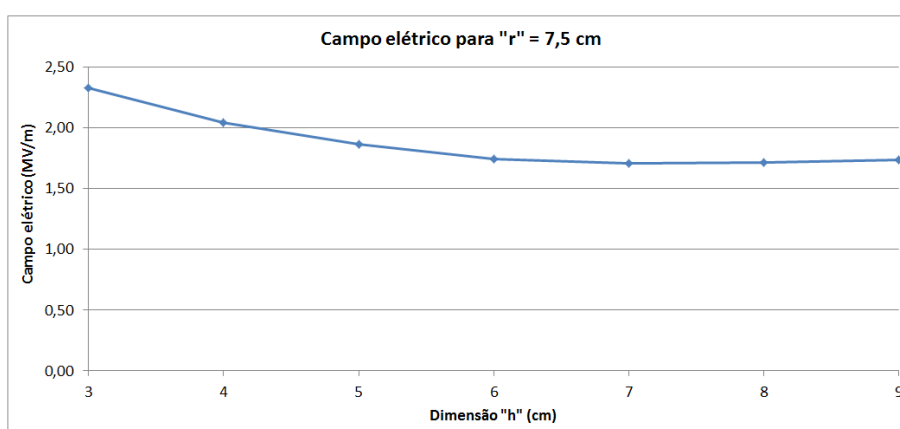


Figura 112. Intensidade do campo elétrico para "r" = 7,5 cm

Para este conjunto de simulações foi possível observar que o valor mínimo da intensidade do campo elétrico refere-se ao ponto “h” igual a 7 cm. Voltando à Figura 112 e retirando a média dos picos, este valor corresponde a 1.707.772,0 V/m.

Os resultados apresentados até este ponto referem-se à dimensão “d” fixa em 1 cm. Para os demais valores de “d”, o mesmo procedimento foi adotado, sendo que o valor mínimo do campo elétrico encontra-se descrito na Tabela 6.

Tabela 6. Dados obtidos na simulação

Diâmetro do anel anti-corona – “d” (cm)	Campo elétrico (V/m)
1	1707772,0
3	1187857,5
5	919863,9
7	766787,9
9	657166,0
11	586116,2
13	525334,2
15	479330,2
17	440173,1
19	407365,1
21	378557,0
23	355634,4
25	337527,5
27	317390,5
29	303091,0
31	285928,2
33	274693,7
35	261461,8
37	253037,5
39	241896,2
41	232587,8

Com os valores da Tabela 6, foi possível construir um gráfico que representa o comportamento da intensidade do campo elétrico mediante as variações do diâmetro do condutor do anel anti-corona (“d”). Este gráfico está ilustrado na Figura 113.

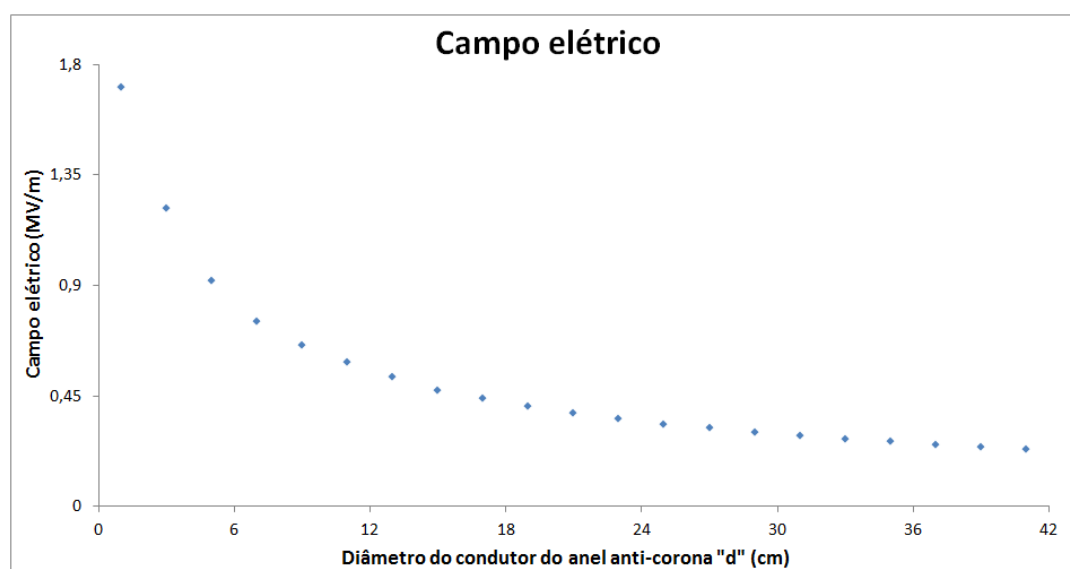


Figura 113. Campo elétrico mediante as variações do diâmetro do condutor do anel anti-corona (“d”)

6.2. Resultados da modelagem matemática

Os dados coletados da simulação foram divididos em dados de identificação e dados de validação, conforme Tabela 7.

Tabela 7. Dados de identificação e dados de validação

Dados de identificação		Dados de validação	
Diâmetro do anel anti-corona – “d” (cm)	Campo elétrico (V/m)	Diâmetro do anel anti-corona – “d” (cm)	Campo elétrico (V/m)
1	1707772,0	3	1187857,5
5	919863,9	7	766787,9
9	657166,0	11	586116,2
13	525334,2	15	479330,2
17	440173,1	19	407365,1
21	378557,0	23	355634,4
25	337527,5	27	317390,5
29	303091,0	31	285928,2
33	274693,7	35	261461,8
37	253037,5	39	241896,2
41	232587,8	-	-

Foi realizado, então, o estudo das funções contidas na Tabela 8, ou seja, essas funções foram escolhidas como candidatas a modelos matemáticos capazes de representar a influência da variação do diâmetro do condutor do anel

anti-corona (“d”) no campo elétrico do isolador, sendo que os coeficientes foram obtidos pelo MMQ.

Tabela 8. Funções e expressões analisadas

Função	Expressão matemática
Linear	$y = -26677x + 1000000$
Exponencial	$y = 1000000e^{-0,043x}$
Logarítmica	$y = -400000 \ln(x) + 1626582,78$
Polinomial de ordem 2	$y = 1417,2x^2 - 86200x + 1506626,8$
Polinomial de ordem 3	$y = -76,764x^3 + 6253,3x^2 - 165896x + 1758439,21$
Polinomial de ordem 4	$y = 4,0603x^4 - 417,83x^3 + 15373x^2 - 248092x + 1906533,451$
Polinomial de ordem 5	$y = -0,21x^5 + 26,107x^4 - 1237,4x^3 + 28116x^2 - 321771x + 2000000$
Polinomial de ordem 6	$y = 0,0103x^6 - 1,5115x^5 + 88,202x^4 - 2626,9x^3 + 42656x^2 - 381915x + 2073821$
Potência	$y = 2000000x^{-0,55} - 14282,648$

As Tabelas 9 a 26, apresentam os resultados obtidos para validação do modelo matemático, utilizando os resultados das simulações como dados de entrada tanto para a estimação quanto para a validação do modelo. A partir desses resultados obtidos (valores estimados), pôde-se validar cada um dos modelos através da análise do erro quadrático médio (RMQ) e da porcentagem, conforme descrito no capítulo anterior.

Tabela 9. Dados estimados com a função Linear

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
1	973323	539415578299	43,01
5	866615	2835443893	5,79
9	759907	10555720558	15,63
13	653199	16349406452	24,34
17	546491	11303493177	24,15
21	439783	3748626438	16,17
25	333075	19824543	1,32
29	226367	5886573904	25,31
33	119659	24035753345	56,44
37	12951	57641528381	94,88
41	-93757	106500959269	140,31
Média		70753900751	40,67

Tabela 10. Dados estimados de validação para a função Linear

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
3	919969	71764282703	22,55
7	813261	2159751263	31,54
11	706553	14505034813	7,86
15	599845	14523817184	2,34
19	493137	7356826791	2,88
23	386429	948307454	5,14
27	279721	1418989376	21,35
31	173013	12749845403	45,49
35	66305	38086172769	76,81
39	-40403	79692850258	115,45
Média		24320587801	33,14

Tabela 11. Dados estimados com a função Exponencial

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
1	957911	562291184161	43,91
5	806541	12841976797	12,32
9	679091	480711383	3,34
13	571781	2157264001	8,84
17	481427	1701909790	9,37
21	405352	717961626	7,08
25	341298	14215006	1,12
29	287366	247288502	5,19
33	241956	1071765678	11,92
37	203722	2432039630	19,49
41	171530	3728121433	26,25
Média		53425858001	13,53

Tabela 12. Dados estimados de validação para a função Exponencial

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
3	878974	95409077372	26,00
7	740078	713429611	3,48
11	623130	1370030353	6,32
15	524663	2055021303	9,46
19	441755	1182663833	8,44
23	371949	266148378	4,59
27	313173	17788352	1,33
31	263685	494759718	7,78
35	222017	1555868295	15,09
39	186934	3020852624	22,72
Média		10608563984	10,52

Tabela 13. Dados estimados com a função Logarítmica

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
1	1626583	6591716494	4,75
5	982808	3961912985	6,84
9	747693	8195135095	13,78
13	600603	5665397457	14,33
17	493297	2822194412	12,07
21	408774	913056958	7,98
25	339032	2264947	0,45
29	279665	548803866	7,73
33	227980	2182191155	17,01
37	182216	5015739668	27,99
41	141154	8360156943	39,31
Média		4023506362	13,84

Tabela 14. Dados estimados de validação para a função Logarítmica

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
3	1187138	517967	0,06
7	848219	6630982431	10,62
11	667425	6611075551	13,87
15	543363	4100161087	13,36
19	448807	1717450532	10,17
23	372385	280585772	4,71
27	308248	83584242	2,88
31	252988	1085064361	11,52
35	204444	3251079102	21,81
39	161158	6518640726	33,38
Média		3027914177	12,24

Tabela 15. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
1	1421844	81754916447	16,74
5	1111057	36554730245	20,78
9	845620	35514923830	28,68
13	625534	10039919269	19,07
17	450798	112879732	2,41
21	321412	3265547887	15,10
25	237377	10030157908	29,67
29	198692	10899153552	34,44
33	205358	4807492590	25,24
37	257374	18801747	1,71
41	354740	14921148443	52,52
Média		18901788332	22,40

Tabela 16. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
3	1260782	5317915032	6,14
7	972670	42387284314	26,85
11	729908	20676096096	24,53
15	532497	2826687428	11,09
19	380436	725173927	6,61
23	273726	6709051345	23,03
27	212366	11030224451	33,09
31	196356	8023181402	31,33
35	225697	1279134525	13,68
39	300388	3421288194	24,18
Média		10239603671	20,05

Tabela 17. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 3

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
1	1598720	11892430436	6,39
5	1075696	24283713107	16,94
9	715932	3453394613	8,94
13	489948	1252154874	6,74
17	368269	5170147052	16,34
21	321417	3264964349	15,09
25	319914	310227140	5,22
29	334283	972959750	10,29
33	335047	3642527782	21,97
37	292728	1575337070	15,69
41	177849	2996356059	23,53
Média		5346746567	13,38

Tabela 18. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 3

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
3	1314958	16154592525	10,70
7	877249	12201628564	14,41
11	588060	3777099	0,33
15	417913	3772046577	12,81
19	337332	4904595819	17,19
23	316839	1505057995	10,91
27	326957	91520268	3,01
31	338208	2733195542	18,28
35	321115	3558530491	22,82
39	246201	18529347	1,78
Média		4494347423	11,22

Tabela 19. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 4

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
1	1673401	1181399001	2,01
5	1000707	6535671846	8,79
9	640960	262632955	2,47
13	477368	2300740336	9,13
17	418088	487753202	5,02
21	396222	312054089	4,67
25	369819	1042767611	9,57
29	321876	352861725	6,20
33	260333	206235651	5,23
37	218079	1222071033	13,82
41	252950	414633937	8,75
Média		1301711035	6,88

Tabela 20. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 4

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
3	1289662	10364127987	8,57
7	789600	520372078	2,97
11	540970	2038213397	7,70
15	439455	1590040413	8,32
19	405685	2823127	0,41
23	385235	876210578	8,32
27	348629	975811264	9,84
31	291333	29214284	1,89
35	233765	767118365	10,59
39	221285	424815293	8,52
Média		1758874679	6,71

Tabela 21. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 5

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
1	1705133	6962577	0,15
5	955031	1236699510	3,82
9	638280	356674447	2,87
13	517684	58530234	1,46
17	458384	331621013	4,14
21	402058	552291570	6,21
25	341116	12874813	1,06
29	292892	104016220	3,36
33	274694	721595	0,31
37	253038	428802839	8,18
41	232588	7333427	1,16
Média		281502568	2,98

Tabela 22. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 5

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
3	1256385	4695987150	5,77
7	760012	45909283	0,88
11	563988	489678173	3,78
15	485508	38166766	1,29
19	431210	568579419	5,85
23	371362	247362373	4,42
27	314063	11075307	1,05
31	279433	42192512	2,27
35	273813	152555471	4,72
39	263959	486757253	9,12
Média		677826371	3,92

Tabela 23. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 6

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
1	1732022	588044760	1,42
5	952847	1087902280	3,59
9	671627	209107136	2,20
13	554135	829473567	5,48
17	472113	1020133869	7,26
21	401067	5066854435	5,95
25	348446	119214166	3,23
29	312195	82885430	3,00
33	269682	25113941	1,82
37	197004	3139772473	22,14
41	118665	12978485100	48,98
Média		1871528923	9,55

Tabela 24. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 6

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
3	1247838	3597685840	5,05
7	777114	106635163	1,35
11	603912	316694900	3,04
15	511663	1045401917	6,75
19	434867	756339334	6,75
23	372081	270483917	4,62
27	329286	141467541	3,75
31	293620	59156195	2,69
35	237507	573849941	9,16
39	153138	7878033927	36,69
Média		1474574867	7,98

Tabela 25. Dados estimados com a função Potência

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
1	1985717	77253526095	16,28
5	810988	11853919626	11,84
9	583023	5497180256	11,28
13	473651	2671108854	9,84
17	406718	1119223506	7,60
21	360526	325122796	4,76
25	326253	127106571	3,34
29	299559	12472443	1,17
33	278030	11129752	1,21
37	260203	51338993	2,83
41	245135	157421406	5,39
Média		9007231844	6,87

Tabela 26. Dados estimados de validação para a função Potência

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	Resíduo Quadrático (V/m) ²	Porcentagem (%)
3	1247838	3597685840	5,05
7	671563	9067871290	12,42
11	520607	4291476828	11,18
15	436721	1815566128	8,89
19	381736	656854073	6,29
23	342234	179573524	3,77
27	312140	27570319	1,65
31	288256	5419247	0,81
35	268721	52701212	2,78
39	252369	109681536	4,33
Média		2812206686	6,13

O gráfico da Figura 114, apresenta as curvas das funções estudadas e os dados de entrada coletados a partir das simulações.

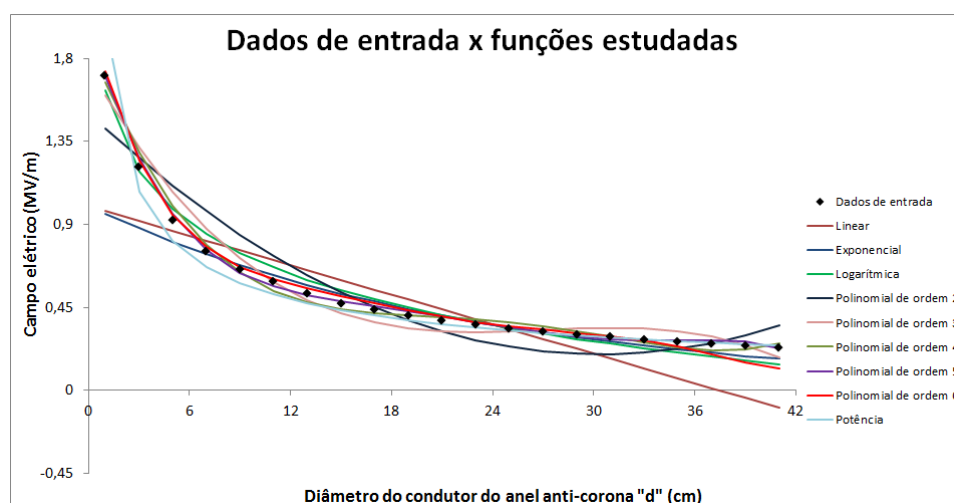


Figura 114. Dados de entrada (“medidos”) x funções estudadas

Com os resultados apresentados nas Tabelas 9 a 26, foi possível observar que dentro os modelos estudados, a Linear, Exponencial, Logarítmica, Polinomial de 2º, mesmo utilizando os dados de entrada para determinação da função, os pontos não obtidos através da função obtida, apresenta grande resíduo, isto ocorre devido estas funções não encaixarem ao comportamento dos dados de entrada. Foi possível observar também que o erro associado a cada uma das funções estudadas. Para uma melhor análise, foram construídas as Tabelas 27 e 28, onde são apresentadas as funções analisadas e os valores mínimos de RMQ e de erro percentual (Método da Porcentagem) para cada uma delas. A partir da análise dessas tabelas, foi possível determinar qual o modelo mais adequado para representar a influência da variação das dimensões do anel anti-corona no campo elétrico do isolador.

Tabela 27. Tabela classificando as funções através do valor mínimo do RMQ

Dados de entrada		Dados de validação	
Modelo	RMQ (V/m) ²	Modelo	RMQ (V/m) ²
Polinomial de ordem 5	281502568	Polinomial de ordem 5	677826371
Polinomial de ordem 4	1301711035	Polinomial de ordem 6	1474574867
Polinomial de ordem 6	1871528923	Polinomial de ordem 4	1758874679
Logarítmica	4023506362	Potência	2812206686
Polinomial de ordem 3	5346746567	Logarítmica	3027914177
Potência	9007231844	Polinomial de ordem 3	4494347423
Polinomial de ordem 2	18901788332	Polinomial de ordem 2	10239603671
Exponencial	53425858001	Exponencial	10608563984
Linear	70753900751	Linear	24320587801

Tabela 28. Tabela classificando as funções através do valor mínimo do erro percentual

Dados de entrada		Dados de validação	
Modelo	Valor (%)	Modelo	Valor (%)
Polinomial de ordem 5	2,98	Polinomial de ordem 5	3,92
Potência	6,87	Potência	6,13
Polinomial de ordem 4	6,88	Polinomial de ordem 4	6,71
Polinomial de ordem 6	9,55	Polinomial de ordem 6	7,98
Polinomial de ordem 3	13,38	Exponencial	10,52
Exponencial	13,53	Polinomial de ordem 3	11,22
Logarítmica	13,84	Logarítmica	12,24
Polinomial de ordem 2	22,40	Polinomial de ordem 2	20,05
Linear	40,67	Linear	33,14

Da análise das Tabelas 27 e 28, pôde-se concluir que o modelo mais adequado para este caso é o modelo Polinomial de ordem 5, $y = -0,21x^5 + 26,107x^4 - 1237,4x^3 + 28116x^2 - 321771x + 2000000$.

6.2.1. Análise refinada

Para uma análise mais aprofundada, foi realizada a divisão dos dados em duas séries de entrada e duas séries de verificação. O objetivo desta nova análise foi verificar se era possível obter outro modelo que melhor representasse a influência da variação das dimensões do anel anti-corona no campo elétrico do isolador.

Para esta nova análise, os dados foram separados da seguinte maneira:

Sequência 1: diâmetro do condutor do anel anti-corona de 1 cm a 17 cm;

Sequência 2: diâmetro do condutor do anel anti-corona maior que 17 cm até 41 cm.

As sequências 1 e 2 foram divididas em dados de entrada utilizados para a identificação do modelo, conforme Tabelas 29 e 30, e dados de validação, conforme Tabelas 31 e 32.

Tabela 29. Dados para a identificação do modelo - Sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona – “d” (cm)	Campo elétrico (V/m)
1	1707772,0
5	919863,9
9	657166,0
13	525334,2
17	440173,1

Tabela 30. Dados para a identificação do modelo - Sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona – “d” (cm)	Campo elétrico (V/m)
17	440173,1
21	378557,0
25	337527,5
29	303091,0
33	274693,7
37	253037,5
41	232587,8

Tabela 31. Dados para validação do modelo - Sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona – “d” (cm)	Campo elétrico (V/m)
3	1187857,5
7	766787,9
11	586116,2
15	479330,2

Tabela 32. Dados para validação do modelo - Sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona – “d” (cm)	Campo elétrico (V/m)
19	407365,1
23	355634,4
27	317390,5
31	285928,2
35	261461,8
39	241896,2

A metodologia de análise para estas duas sequencias foi realizada conforme foi descrito na seção Metodologia.

6.2.1.1. Sequência 1

Os diferentes modelos identificados, ou seja, com seus parâmetros já determinados, para a sequência 1, são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33. Modelos identificados para a sequência 1

Função	Expressão matemática
Linear	$y = -73243x + 1509249$
Exponencial	$y = 2000000e^{-0,082x}$
Logarítmica	$y = -500000 \ln(x) + 1770544,39$
Polinomial de ordem 2	$y = 6858,8x^2 - 196701x + 1845326,47$
Polinomial de ordem 3	$y = -623,1x^3 + 23682x^2 - 314217x + 1994547,166$
Polinomial de ordem 4	$y = 50,48x^4 - 2440,4x^3 + 44639x^2 - 397033x + 2062569,2$
Potência	$y = 2000000x^{-0,472} - 103087,77$

As Tabelas 34 a 47, apresentam os dados estimados e os dados estimados de validação para as funções estudadas na sequência 1.

Tabela 34. Dados estimados com a função Linear da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
1	1436006	73856849301	15,91
5	1143034	49804899645	24,26
9	850062	37208880853	29,35
13	557090	1008430678	6,04
17	264118	30995402679	40,00
Média		38574892631	23,11

Tabela 35. Dados estimados de validação para a função Linear da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
3	1289520	10335250901	8,56
7	996548	52789714622	29,96
11	703576	13796816337	20,04
15	410604	4723290473	14,34
Média		20411268083	18,23

Tabela 36. Dados estimados com a função Exponencial da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
1	1630424	5982808891	4,53
5	1115180	38148435156	21,23
9	744018	7543246075	13,22
13	476646	2370518814	9,27
17	284042	24377044010	35,47
Média		15684410589	16,74

Tabela 37. Dados estimados de validação para a função Exponencial da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
3	1351724	26852235029	13,80
7	914415	21793868226	19,25
11	599394	176309159	2,27
15	372465	111420216700	22,29
Média		15060657278	14,40

Tabela 38. Dados estimados com a função Logarítmica da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
1	1770544	3940352032	3,68
5	965825	2112463846	5,00
9	671932	218038823	2,25
13	488070	1388642303	7,09
17	353938	7436543290	19,59
Média		3019208059	7,52

Tabela 39. Dados estimados de validação para a função Logarítmica da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
3	1221238	1114269911	2,81
7	797589	948728679	4,02
11	571597	210812875	2,48
15	416519	3945210398	13,10
Média		1554755466	5,60

Tabela 40. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 2 da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
1	1655484	2734024129	3,06
5	1033291	12865816742	12,33
9	630580	706799105	4,05
13	447351	6081431334	14,84
17	483603	1886126454	9,87
Média		4854839553	8,83

Tabela 41. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 2 da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
3	1655484	2734024129	3,06
7	1033291	12865816742	12,33
11	630580	706799105	4,05
15	447351	6081431334	14,84
Média		5597017827	8,57

Tabela 42. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 3 da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
1	1703389	19211571	0,26
5	937625	315445295	1,93
9	630596	705948831	4,04
13	543034	313263930	3,37
17	435666	20315272	1,02
Média		274836980	2,12

Tabela 43. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 3 da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
3	1248210	3642472784	5,08
7	741723	628254722	3,27
11	574336	138770382	2,01
15	506780	753473221	5,73
Média		1290742777	4,02

Tabela 44. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 4 da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
1	1707785	172	0,00
5	919879	235	0,00
9	657179	167	0,00
13	525332	6	0,00
17	440134	1524	0,01
Média		421	0,00

Tabela 45. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 4 da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
3	1211419	555154463	1,98
7	754795	143841545	1,56
11	587431	1727463	0,22
15	470049	86136948	1,94
Média		196715105	1,43

Tabela 46. Dados estimados com a função Potência da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
1	1896912	35773963588	11,08
5	832568	7620551652	9,49
9	605882	2630076125	7,80
13	492916	1050964185	6,17
17	422032	329111566	4,12
Média		9480933423	7,73

Tabela 47. Dados estimados de validação para a função Potência da sequência 1

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
3	1087685	10034614763	8,43
7	695171	5128971070	9,34
11	541813	1962801636	7,56
15	453989	642184668	5,29
Média		4442143034	7,65

Com os resultados apresentados nas Tabelas 34 a 47, foi possível observar o erro associado a cada uma das funções estudadas. Para uma melhor

análise, foram construídas as Tabelas 48 e 49, onde são apresentadas as funções analisadas (modelos analisados) e os valores mínimos de RMQ e de erro percentual para cada uma delas. A partir da análise dessas tabelas, foi possível determinar qual o modelo mais adequado para representar a influência da variação das dimensões do anel anti-corona no campo elétrico do isolador.

Tabela 48. Tabela classificando as funções da sequência 1 através do valor mínimo do RMQ

Dados de entrada		Dados de validação	
Modelo	RMQ	Modelo	RMQ
Polinomial de ordem 4	421	Polinomial de ordem 4	196715105
Polinomial de ordem 3	274836980	Polinomial de ordem 3	1290742777
Logarítmica	3019208059	Logarítmica	1554755466
Polinomial de ordem 2	4854839553	Potência	4442143034
Potência	9480933423	Polinomial de ordem 2	5597017827
Exponencial	15684410589	Exponencial	15060657278
Linear	279411567843	Linear	354528832364

Tabela 49. Tabela classificando as funções da sequência 1 através do valor mínimo do erro percentual

Dados de entrada		Dados de validação	
Modelo	Valor (%)	Modelo	Valor (%)
Polinomial de ordem 4	0,00	Polinomial de ordem 4	1,43
Polinomial de ordem 3	2,12	Polinomial de ordem 3	4,02
Logarítmica	7,52	Logarítmica	5,60
Potência	7,73	Potência	7,65
Polinomial de ordem 2	8,83	Polinomial de ordem 2	8,57
Exponencial	16,74	Exponencial	14,40
Linear	73,08	Linear	83,91

Mediante aos dados obtidos nas Tabelas 48 e 49, pode-se afirmar que os menores valores de erros, tanto no Método do RMQ quanto no Método do Erro Percentual, foram obtidos com a função Polinomial de ordem 4. Portanto, esta função, dentre as estudadas, é a que melhor representa os dados de entrada da sequência 1.

6.2.1.2. Sequência 2

As funções estudadas na sequência 2 são apresentadas na Tabela 50.

Tabela 50. Modelos identificados para a sequência 2

Função	Expressão matemática
Linear	$y = -8362,8x + 559615$
Exponencial	$y = 661339e^{-0,026x}$
Logarítmica	$y = -200000 \ln(x) + 976000$
Polinomial de ordem 2	$y = 234,21x^2 - 21947x + 741596$
Polinomial de ordem 3	$y = -8,3472x^3 + 960,42x^2 - 42072x + 918065$
Polinomial de ordem 4	$y = 50,48x^4 - 2440,4x^3 + 44639x^2 - 397033x + 2062569,2$
Polinomial de ordem 5	$y = -0,0801x^5 + 12,022x^4 - 714,6x^3 + 21206x^2 - 324604x + 2453000$
Polinomial de ordem 6	$y = 0,0016x^6 - 0,3569x^5 + 31,754x^4 - 1451,6x^3 + 36406x^2 - 488574x + 3145000$
Potência	$y = 3390000x^{-0,72}$

As Tabelas 51 a 68, apresentam os dados estimados e os dados estimados de validação para as funções estudadas na sequência 2.

Tabela 51. Dados estimados com a função Linear da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
17	417447	516458014	5,16
21	383996	29585195	1,44
25	350545	169455930	3,86
29	317094	196078093	4,62
33	283643	80083092	3,26
37	250191	8100296	1,12
41	216740	251147921	6,81
Média		178701220	3,75

Tabela 52. Dados estimados de validação para a função Linear da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
19	400722	4413818	1,63
23	367271	135401175	3,27
27	333819	269909564	5,18
31	300368	208513215	5,05
35	266917	29759314	2,09
39	233466	71072001	3,49
Média		126464681	3,45

Tabela 53. Dados estimados com a função Exponencial da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
17	425075	227940891	3,43
21	383089	20536598	1,20
25	345249	59625515	2,29
29	311147	64904461	2,66
33	280414	32720360	2,08
37	252716	103325	0,13
41	227754	23365047	2,08
Média		61313742	1,98

Tabela 54. Dados estimados de validação para a função Exponencial da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
19	403536	14658980	0,94
23	363677	64686103	2,26
27	327755	107424659	3,27
31	295381	89358075	3,31
35	266205	22497734	1,81
39	239911	3942488	0,82
Média		50428006	2,07

Tabela 55. Dados estimados com a função Logarítmica da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
17	409357	949612385	7,00
21	367096	131365067	3,03
25	332225	28118002	1,57
29	302541	302695	0,18
33	276699	4019237	0,73
37	253816	606710	0,31
41	233286	486840	0,30
Média		159215848	1,87

Tabela 56. Dados estimados de validação para a função Logarítmica da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
19	387112	410177910	4,97
23	348901	45336550	1,89
27	316833	31195	0,18
31	289203	10721340	1,15
35	264930	12031168	1,33
39	243288	1936132	0,58
Média		80085716	1,68

Tabela 57. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 2 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
17	436184	15915493	0,91
21	383996	29578777	1,44
25	339302	3149823	0,53
29	302104	974961	0,33
33	272400	5262410	0,84
37	250191	8105477	1,13
41	233186	486840	0,30
Média		9067683	0,78

Tabela 58. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 2 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
19	409153	3196073	0,44
23	360712	25782946	1,43
27	319766	5643545	0,75
31	286315	149457	0,14
35	260358	1217801	0,42
39	241896	0	0,00
Média		5998304	0,53

Tabela 59. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 3 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
17	439393	609221	0,18
21	380795	5007875	0,59
25	336103	2030557	0,42
29	302110	961678	0,32
33	275613	845240	0,33
37	253405	135245	0,15
41	232282	93757	0,13
Média		1383368	0,30

Tabela 60. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 3 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
19	408155	624292	0,19
23	356911	1629194	0,36
27	317969	334971	0,18
31	288125	4826684	0,77
35	264173	7352285	1,04
39	242908	1024229	0,42
Média		2631942	0,49

Tabela 61. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 4 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
17	439142	1062530	0,23
21	378741	33753	0,05
25	335509	4073993	0,60
29	302441	422861	0,21
33	275065	137609	0,14
37	251445	2534949	0,63
41	232183	163861	0,17
Média		1204222	0,29

Tabela 62. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 4 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
19	406258	1224922	0,27
23	355476	25098	0,04
27	318043	426253	0,21
31	288222	5259401	0,80
35	262807	1810430	0,51
39	241133	582483	0,32
Média		1554764	0,36

Tabela 63. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 5 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
17	442795	6874903	0,60
21	381166	6804373	0,69
25	339892	5591860	0,70
29	305340	5056813	0,74
33	276219	2326840	0,56
37	253745	500251	0,28
41	231792	632670	0,34
Média		3969673	0,56

Tabela 64. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 5 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
19	407832	218162	0,11
23	359241	13009214	1,01
27	322031	21529376	1,46
31	289968	16318801	1,41
35	264247	7754957	1,07
39	243642	3047611	0,72
Média		10313020	0,97

Tabela 65. Dados estimados com a função Polinomial de ordem 6 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
17	412864	745777741	6,20
21	351884	711435691	7,05
25	312330	634928547	7,47
29	281017	487274798	7,28
33	258705	255630905	5,82
37	248094	24442214	1,95
41	246532	194435012	6,00
Média		436274987	5,97

Tabela 66. Dados estimados de validação para a função Polinomial de ordem 6 da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
19	377902	868053230	7,23
23	330753	619107915	7,00
27	295759	467938548	6,82
31	268504	303598621	6,09
35	251924	90968250	3,65
39	246659	22679381	1,97
Média		395390991	5,46

Tabela 67. Dados estimados com a função Potência da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
17	440835	438642	0,15
21	378619	3783	0,02
25	333951	12790390	1,06
29	300105	8916641	0,99
33	273445	1559724	0,45
37	251823	1476334	0,48
41	233881	1672773	0,56
Média		3836898	0,53

Tabela 68. Dados estimados de validação para a função Potência da sequência 2

Diâmetro do anel anti-corona (cm)	Campo elétrico estimado (V/m)	RMQ	Porcentagem (%)
19	406909	208147	0,11
23	354614	1041582	0,29
27	315950	2076168	0,45
31	286035	11418	0,04
35	262102	410156	0,24
39	242456	313506	0,23
Média		676829	0,23

Com os resultados apresentados nas Tabelas 51 a 68, foi possível observar o erro associado a cada uma das funções estudadas. Para uma melhor análise, foram construídas as Tabelas 69 e 70, onde são apresentadas as funções analisadas (modelos analisados) e os valores mínimos de RMQ e de erro percentual para cada uma delas. A partir da análise dessas tabelas, foi possível determinar qual o modelo mais adequado para representar a influência da variação das dimensões do anel anti-corona no campo elétrico do isolador.

Tabela 69. Tabela classificando as funções da sequência 2 através do valor mínimo do RMQ

Dados de entrada		Dados de validação	
Modelo	RMQ	Modelo	RMQ
Polinomial de ordem 4	1204222	Potência	676829
Polinomial de ordem 3	1383368	Polinomial de ordem 4	1554764
Potência	3836898	Polinomial de ordem 3	2631942
Polinomial de ordem 5	3969673	Polinomial de ordem 2	5998304
Polinomial de ordem 2	9067683	Polinomial de ordem 5	10313020
Exponencial	61313742	Exponencial	50428006
Logarítmica	159215848	Logarítmica	80085716
Linear	178701220	Linear	126464681
Polinomial de ordem 6	436274987	Polinomial de ordem 6	395390991

Tabela 70. Tabela classificando as funções da sequência 2 através do valor mínimo do erro percentual

Dados de entrada		Dados de validação	
Modelo	Valor (%)	Modelo	Valor (%)
Polinomial de ordem 4	0,29	Potência	0,23
Polinomial de ordem 3	0,30	Polinomial de ordem 4	0,36
Potência	0,53	Polinomial de ordem 3	0,49
Polinomial de ordem 5	0,56	Polinomial de ordem 2	0,53
Polinomial de ordem 2	0,78	Polinomial de ordem 5	0,97
Logarítmica	1,87	Logarítmica	1,68
Exponencial	1,98	Exponencial	2,07
Linear	3,75	Linear	3,45
Polinomial de ordem 6	5,97	Polinomial de ordem 6	5,46

Mediante aos dados obtidos nas Tabelas 69 e 70, pode-se afirmar que a função Polinomial de ordem 4 apresentou o menor resíduo mediante os dados de identificação, tanto pelo RMQ e o Método do Erro Percentual, enquanto que a função Potência apresentou o menor resíduo mediante os dados de validação, tanto pelo RMQ quanto pelo Método do Erro Percentual. Para a escolha da função que melhor represente os dados de entrada será realizado a média entre

os valores dos resíduos obtidos nos dados de identificação com os dados de validação para então determinarmos qual a função que melhor representa os dados de entrada. A Tabela 71 apresenta o valor destas médias em ordem crescente.

Tabela 71. Tabela classificando as funções da sequência 2 através do valor mínimo da média

Dados médios do RMQ		Dados médios da potência	
Modelo	Valor	Modelo	Valor
Polinomial de ordem 4	1379493	Polinomial de ordem 4	0,33
Polinomial de ordem 3	2007655	Potência	0,38
Potência	2256864	Polinomial de ordem 3	0,40
Polinomial de ordem 5	7141347	Polinomial de ordem 2	0,66
Polinomial de ordem 2	7532993	Polinomial de ordem 5	0,77
Exponencial	55870874	Logarítmica	1,78
Logarítmica	119650782	Exponencial	2,03
Linear	152582951	Linear	3,60
Polinomial de ordem 6	415832989	Polinomial de ordem 6	5,72

Mediante aos dados obtidos nas Tabela 71 podemos afirmar que os menores valores de resíduos considerando os dados de identificação e os dados de validação, tanto no RMQ e no Método do Erro Percentual, foram obtidos com a função Polinomial de ordem 4, portanto esta função, dentre as estudadas, é a que melhor representa os dados de entrada da sequência 2.

6.2.2. Gráfico das funções

A partir da aplicação da metodologia descrita neste trabalho, foi possível determinar, dentre uma família de modelos matemáticos, o modelo mais adequado para representar a influência das dimensões do anel anti-corona na intensidade do campo elétrico do isolador. Para a primeira análise realizada em 6.2 – Resultados da modelagem matemática, o modelo mais adequado foi o modelo Polinomial de ordem 5 ($y = -0,21x^5 + 26,107x^4 - 1237,4x^3 + 28116x^2 - 321771x + 2000000$). A Figura 115, ilustra a curva que representa esse modelo e os dados de entrada obtidos a partir da simulação.

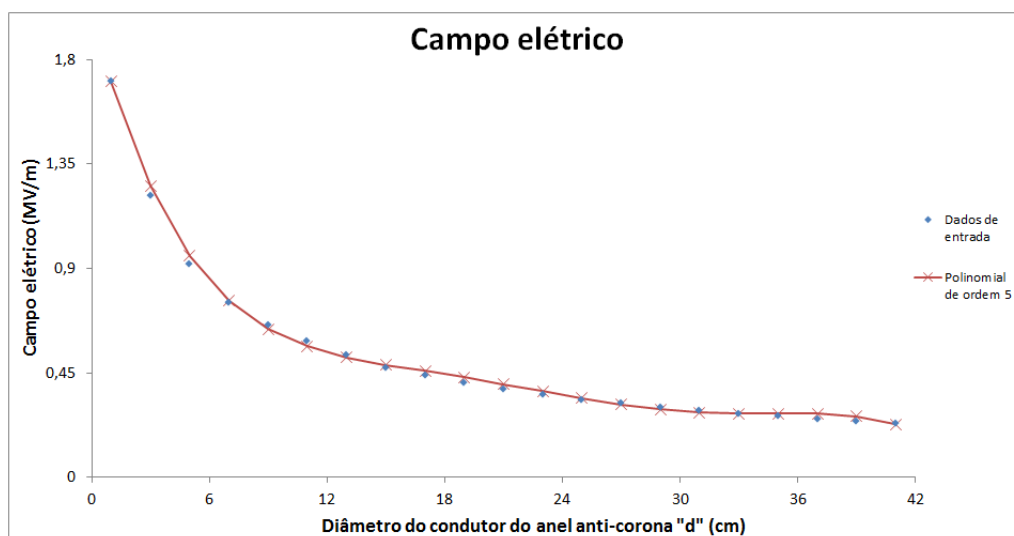


Figura 115. Gráfico comparando os dados de entrada com a função Polinomial de ordem 5.

Para a segunda análise realizada em 6.2.1.1. Sequência 1 e 6.2.1.2. Sequência 2, o modelo Polinomial de ordem 4 ($y = 50,48x^4 - 2440,4x^3 + 44639x^2 - 397033x + 2062569,2$) foi o modelo mais adequado para a sequência 1 e o modelo Polinomial de ordem 4 ($y = 0,4127x^4 - 56,215x^3 + 2979,5x^2 - 78664x + 1157070$) foi o modelo mais adequado para a sequência 2. A Figura 116, ilustra a curva que representa esse modelo e os dados de entrada obtidos a partir da simulação.

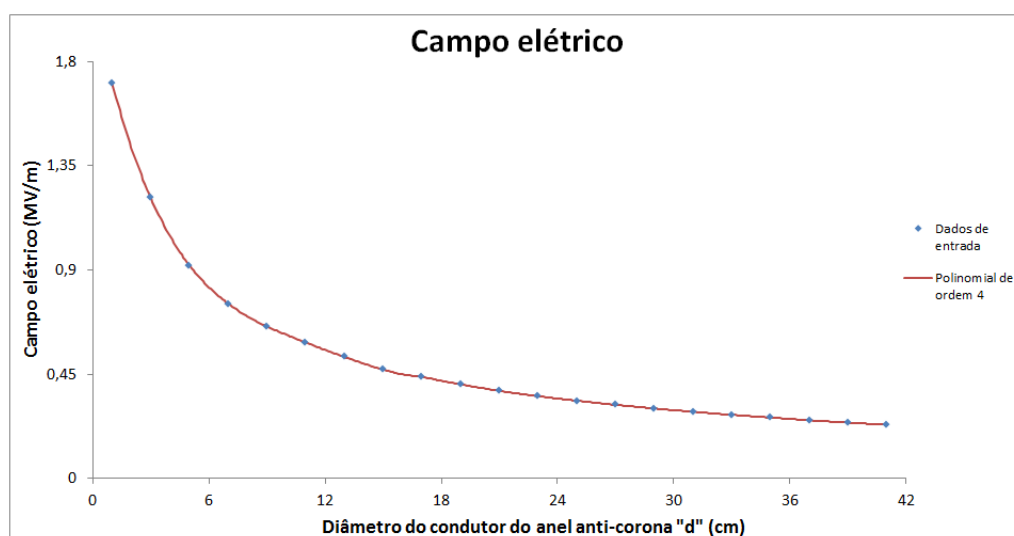


Figura 116. Gráfico comparando os dados de entrada com a função Polinomial de ordem 4 (equações 17 e 24)

Após estas análises, pôde-se concluir que as equações (66) e (67) citadas são as que melhor representam a série de dados de entrada. Assim, obtivemos o seguinte modelo, que corresponde a um sistema de equações, para representar essas duas sequências:

$$y = 50,48x^4 - 2440,4x^3 + 44639x^2 - 397033x + 2062569,2 \quad (66)$$

para $1 < x \leq 17$

$$y = 0,4127x^4 - 56,215x^3 + 2979,5x^2 - 78664x + 1157070 \quad (67)$$

para $17 < x \leq 41$

Onde: y = campo elétrico [V/m]

x = diâmetro do condutor do anel anti-corona [cm]

6.3. Resultado do ensaio laboratorial

O ensaio foi realizado, utilizando uma fonte de tensão alternada de 350 kV, conforme Figura 117.



Figura 117. Fonte de tensão de 350 kV

A fonte de tensão utilizada é isenta de descargas parciais. Assim, todo campo elétrico estará concentrado ao redor do objeto sob ensaio.

Os sensores utilizados são mostrados nas Figuras 118, 119 e 120, sendo que os sensores das Figuras 118 e 119 são conectados a um computador, enquanto que o sensor da Figura 120 é alimentado por uma bateria de 12V.



Figura 118. Sensor RFBee – Nó sensor 1



Figura 119. Sensor RFBee – Nó sensor 2

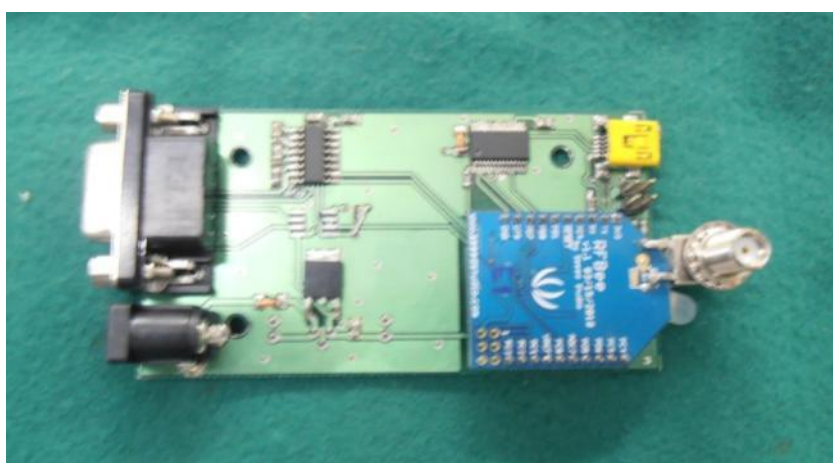


Figura 120. Sensor RFBee na plataforma Arduino

O sensor da Figura 118 foi utilizado para enviar os dados na portadora de 915 MHz, enquanto que os sensores das Figuras 119 e 120 foram utilizados para realizar o experimento de medição de RSSI e PER.

6.3.1. Antenas Direcionais

As Figuras 121 e 122 mostram o arranjo do ensaio de transmissão de dados.



Figura 121. Sistema transmissor (antena e sensor)



Figura 122. Sistema receptor

Na primeira etapa deste ensaio, foram utilizadas duas antenas direcionais sendo uma utilizada na transmissão e a outra na recepção. A antena utilizada na transmissão estava acoplada a um sensor de transmissão que constantemente enviava dados através da portadora com frequência centrada em 915 MHz. A antena utilizada na recepção estava acoplada ao analisador de espectro. Os

dados adquiridos no analisador de espectros foram salvos em um arquivo *.CSV, possibilitando o traçado de gráficos dos sinais recebidos.

A linha de visada entre as duas antenas passava pelo ponto de maior intensidade do campo elétrico (1º pico). O intuito era verificar se a intensidade do campo elétrico naquele ponto específico interferiria na variação da frequência central da portadora (915 MHz), considerando este ponto o pior caso para realizar uma comunicação de dados. O ponto de maior intensidade é o de altura igual a 16,35 cm, conforme pode se visualizado no gráfico da Figura 123, que encontra-se repetida aqui para a conveniência do leitor.

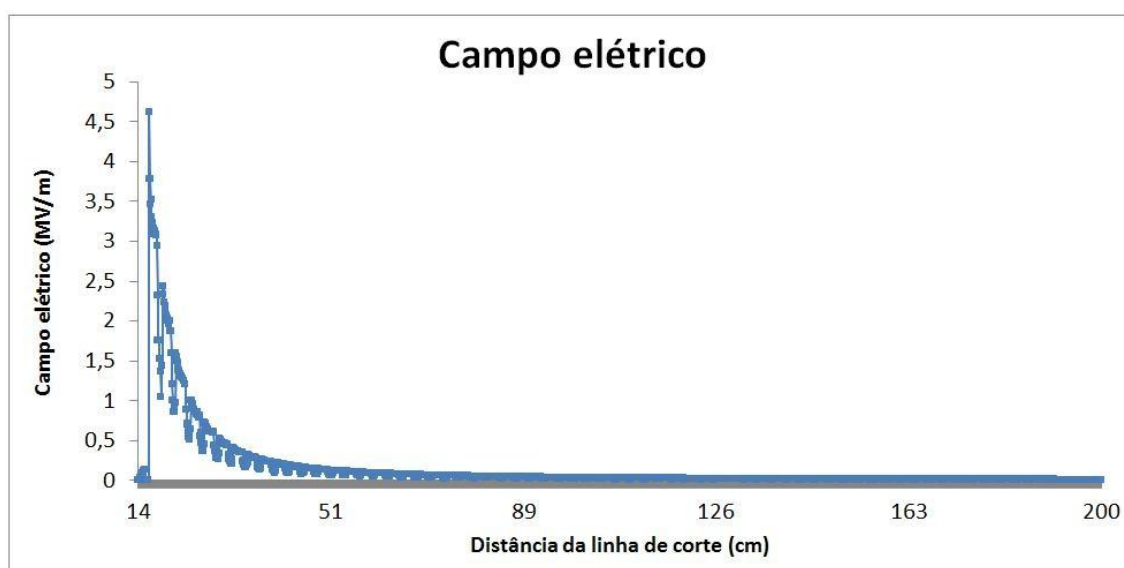


Figura 123. Intensidade do campo elétrico no isolador polimérico da classe de tensão 500 kV, sem anel anti-corona

O experimento foi realizado para quatro situações:

- 1 – isolador sem anel anti-corona e sem aplicação de tensão;
- 2 – isolador sem anel anti-corona e com aplicação de tensão;
- 3 – isolador com anel anti-corona com diâmetro do anel condutor de 1,5 cm e com aplicação de tensão;
- 4 – isolador com anel anti-corona com diâmetro do anel condutor de 7,0 cm e com aplicação de tensão.

Para facilidade na apresentação dos resultados, foi denominado de anel “pequeno”, o anel anti-corona com diâmetro do tubo circular igual a 1,5 cm, e de anel “grande”, o anel anti-corona com diâmetro do tubo circular igual a 7,0 cm.

Utilizando a equação (66), pôde-se obter o valor da intensidade do campo elétrico no terminal fase do isolador que é de:

Para o isolador com anel “pequeno”: 1.559.477 V/m

Para o isolador com anel “grande”: 754.794 V/m

Os níveis de intensidade do campo elétrico foram obtidos com o isolador conforme Figuras 124, 125 e 126.



Figura 124. Isolador sem anel anti-corona



Figura 125. Isolador com anel “pequeno”



Figura 126. Isolador com anel “grande”

6.3.1.1. Análise da variação da portadora

Os gráficos das Figuras 127, 128 e 129 apresentam o sinal decorrente da transmissão com portadora centrada em 915 MHz, utilizando o isolador sem

aplicação de tensão. Os gráficos das Figuras 130, 131 e 132 apresentam o sinal decorrente da transmissão, utilizando o isolador sem anel anti-corona e com aplicação de tensão. Os gráficos das Figuras 133, 134 e 135 apresentam o sinal decorrente da transmissão utilizando o isolador com anel “pequeno” e com aplicação de tensão e os gráficos das Figuras 136, 137 e 138 apresentam o sinal decorrente da transmissão utilizando o isolador com anel “grande”.

Para cada sequência de ensaios são apresentados 3 gráficos, uma vez que o *software* Excel, utilizado para geração de gráficos, suporta apenas 255 curvas.

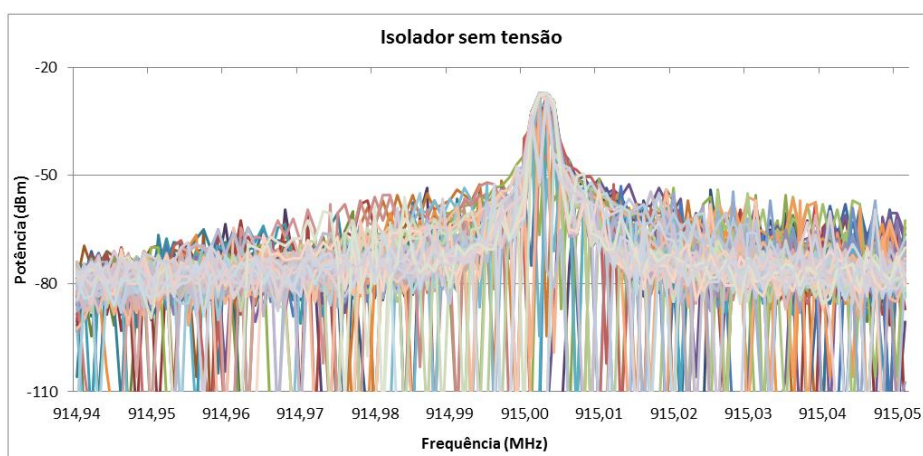


Figura 127. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 1)

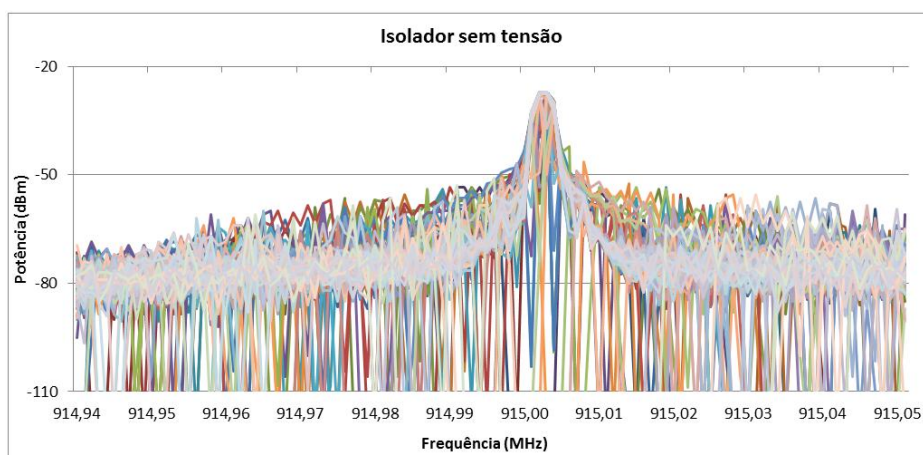


Figura 128. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 2)

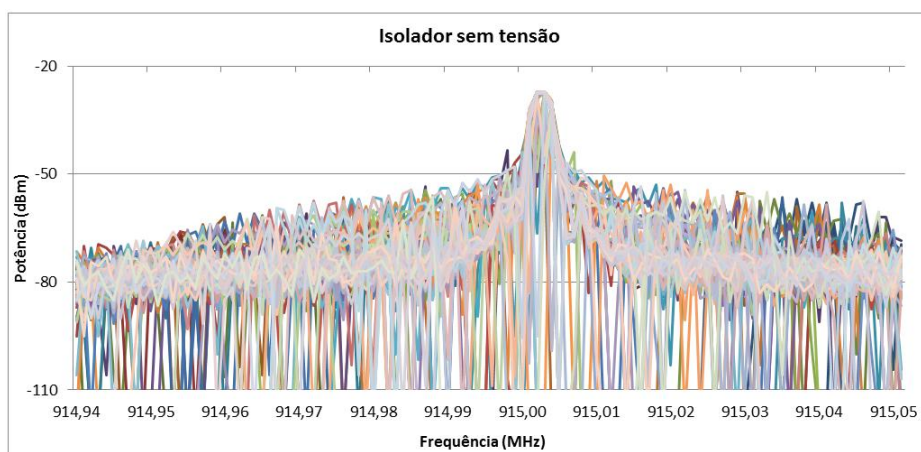


Figura 129. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 3)

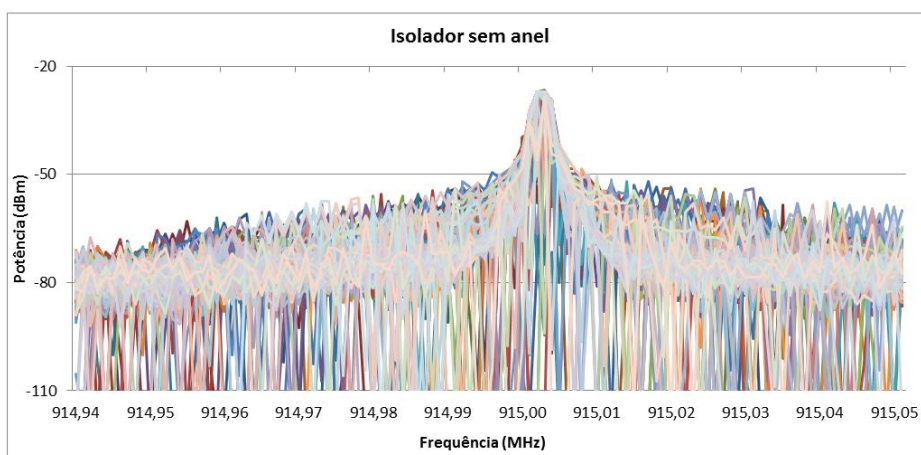


Figura 130. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem anel anti-corona (parte 1)

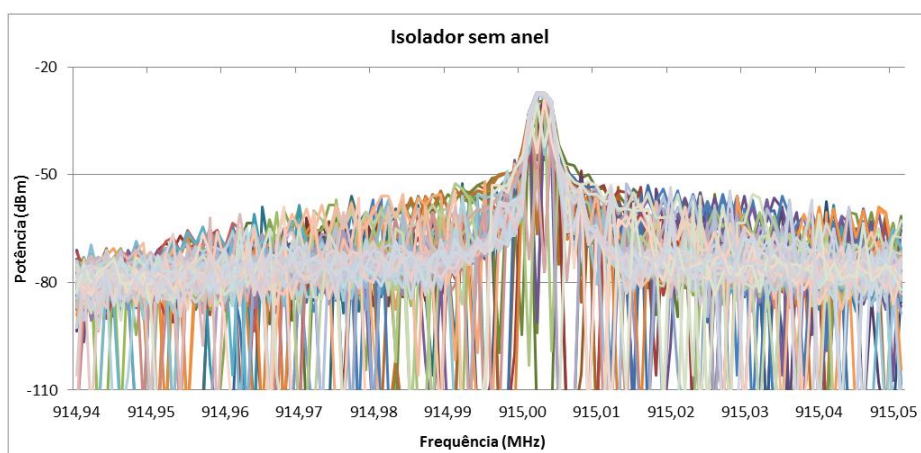


Figura 131. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem anel anti-corona (parte 2)

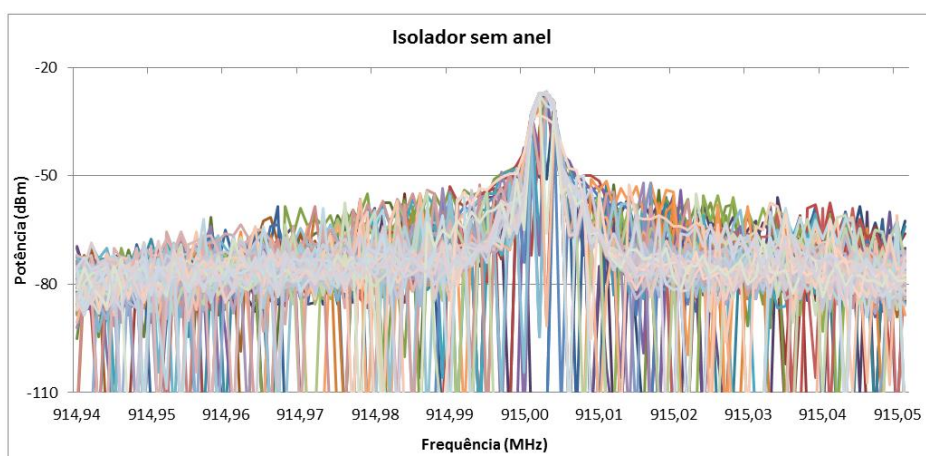


Figura 132. Sinal da transmissão utilizando isolador sem anel anti-corona (parte 3)

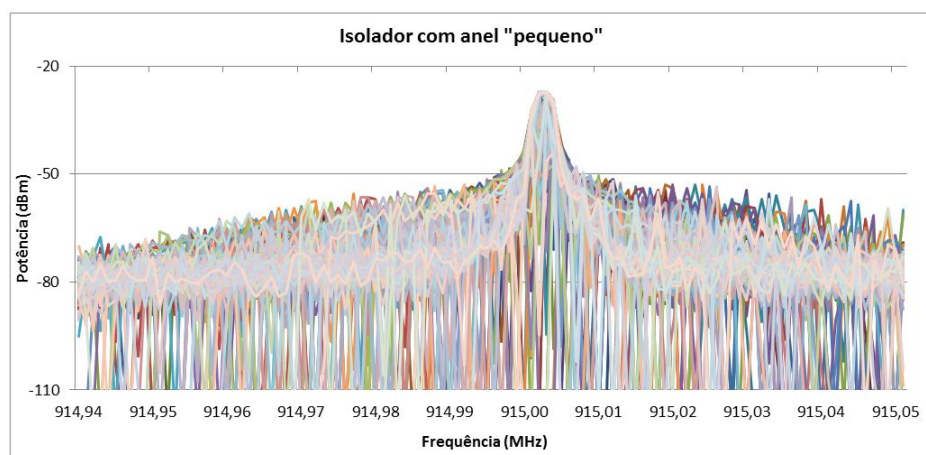


Figura 133. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel "pequeno" (parte 1)

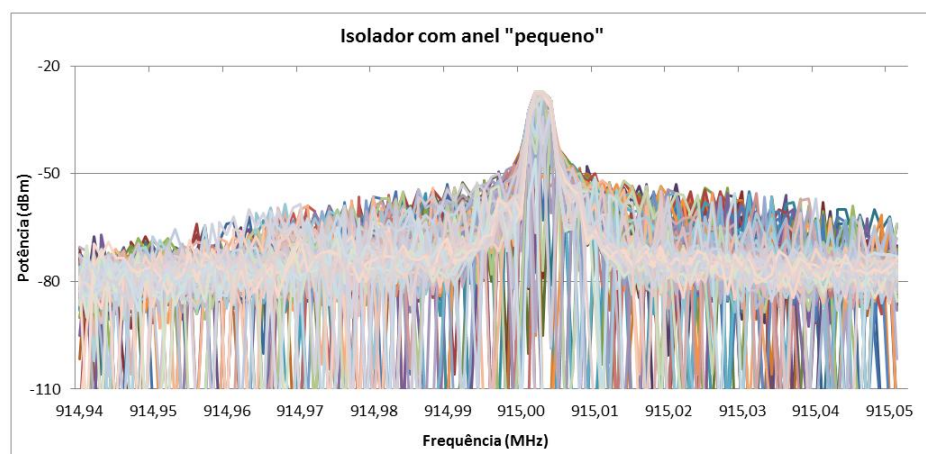


Figura 134. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel "pequeno" (parte 2)

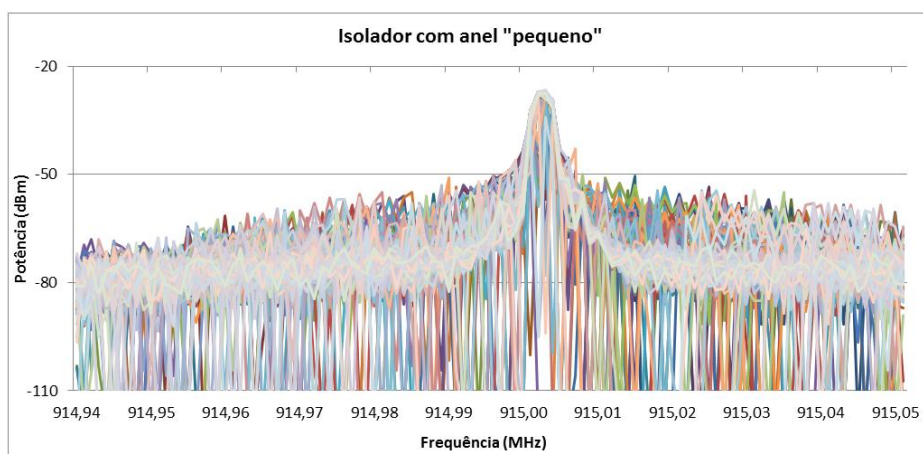


Figura 135. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel "pequeno" (parte 3)

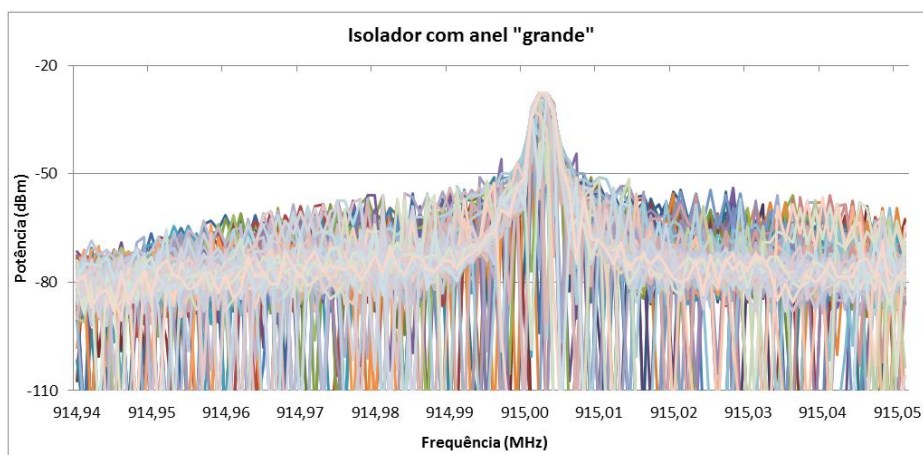


Figura 136. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel "grande" (parte 1)

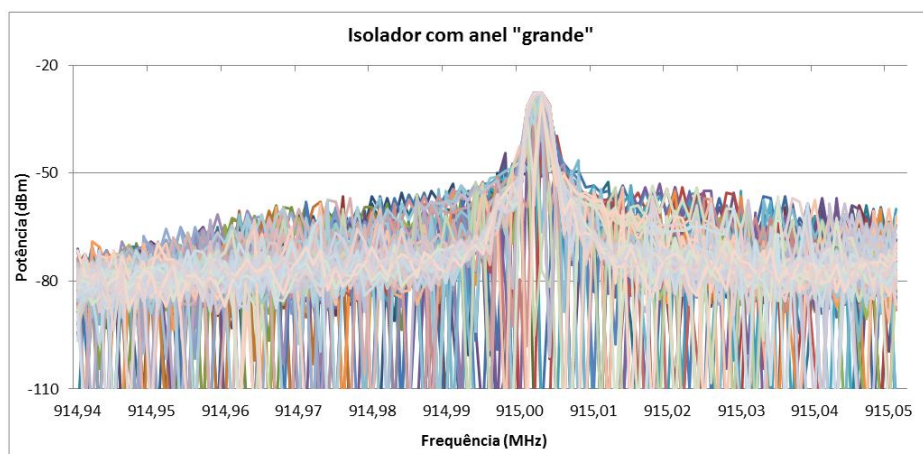


Figura 137. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel "grande" (parte 2)

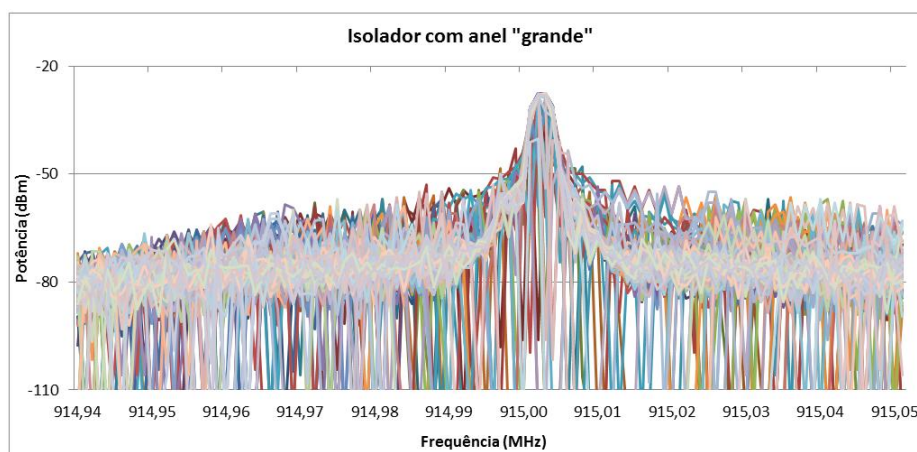


Figura 138. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel “grande” (parte 3)

6.3.1.2. Análise da RSSI e PER

Utilizando o mesmo circuito com as antenas direcionais, foram utilizados dois sensores, tendo por finalidade enviar pacotes de um sensor ao outro. O sensor base, chamado transmissor, envia um pacote contendo em seu cabeçalho um número. Este número é sequencial e é utilizado para a contagem do número de pacotes perdidos (PER). O outro sensor, chamado receptor, recebe este pacote e retransmite o pacote até o sensor base. Neste envio, o sensor receptor inclui um número que é utilizado para contagem do número de pacotes. A Figura 139 demonstra este esquema.

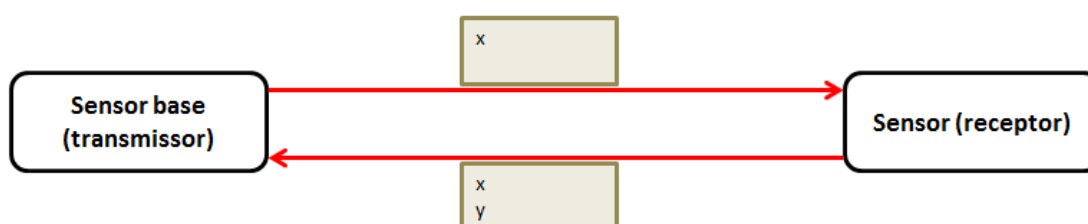


Figura 139. Esquema de comunicação de dados entre os sensores

Na Figura 139, pode-se verificar o funcionamento deste experimento, no qual o sensor base envia um pacote de dados, contendo um número (x). Este número é sequencial e a cada pacote enviado pelo sensor este número cresce. Ao receber o pacote, o sensor (receptor) mede a RSSI do sinal, e reenvia o

pacote colocando um novo número que é sequencial do sensor receptor. Estes números são utilizados para verificar o número de pacotes perdidos, pois cada vez que um pacote se perde é necessário reenviar um novo com o mesmo número. O valor da RSSI de transmissão e recepção bem como o número de pacotes é salvo em um arquivo *.TXT, sendo possível sua análise futura.

Os gráficos das Figuras 140, 141, 142 e 143, mostram a RSSI no sensor base (potência na transmissão) e no sensor receptor (potência na recepção) dos experimentos utilizando o isolador sem tensão, isolador sem anel anti-corona (com tensão), isolador com anel “pequeno” (com tensão) e isolador com anel “grande” (com tensão) respectivamente.

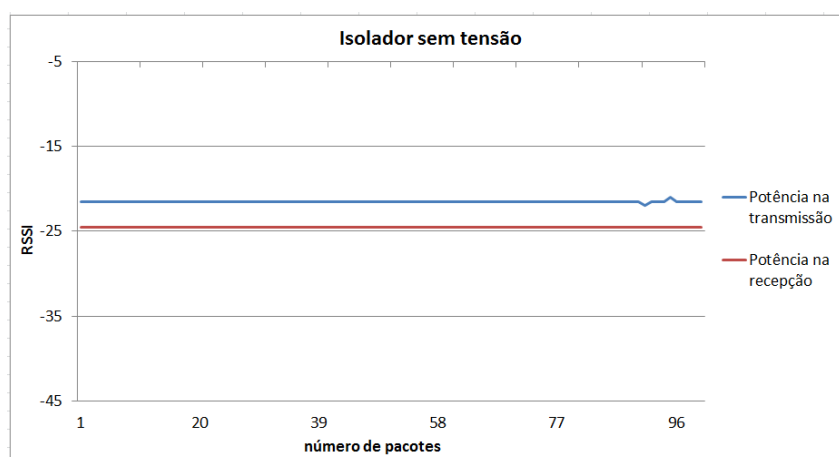


Figura 140. Dados do experimento – isolador sem tensão

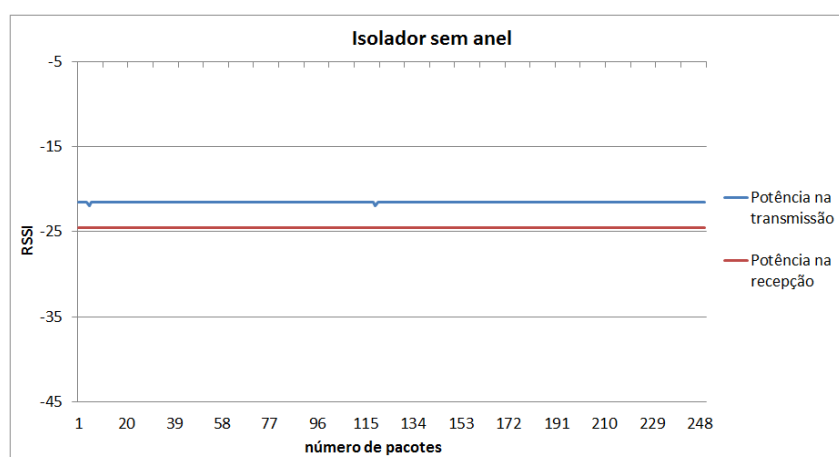


Figura 141. Dados do experimento – isolador sem anel

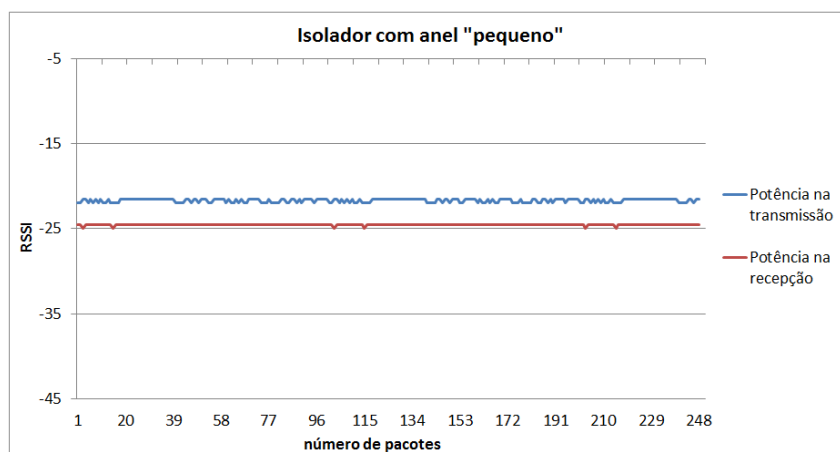


Figura 142. Dados do experimento – isolador com anel pequeno

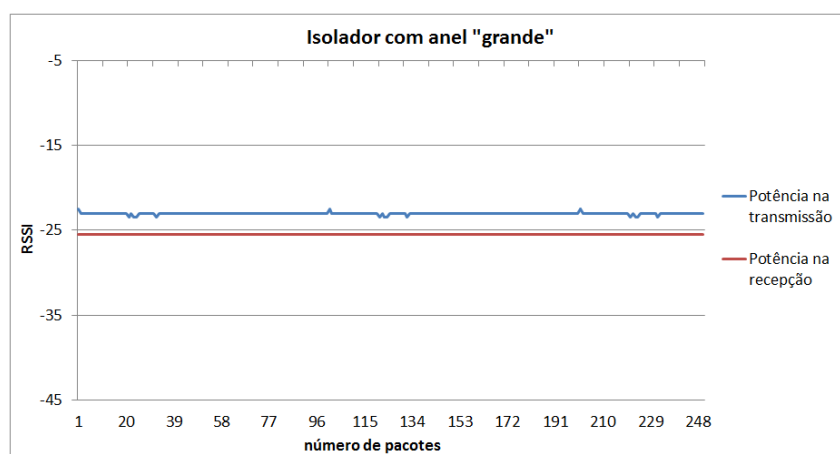


Figura 143. Dados do experimento – isolador com anel grande

Para a comunicação do isolador sem tensão foram transmitidos 100 pacotes, enquanto que para as demais transmissões foram transmitidos 250 pacotes.

O valor de 100 pacotes foi utilizado para conhecer o comportamento da transmissão com o isolador sem tensão. Com este número de pacotes pôde-se perceber um padrão na comunicação.

Com o intuito de uma melhor análise, foram transmitidos 250 pacotes, onde também foi possível perceber um padrão na comunicação.

O número de pacotes enviados transmitidos, recebidos e com erros durante o experimento é mostrado na Tabela 72.

Tabela 72. Número de pacotes na comunicação de dados

Configuração	Número de pacotes transmitidos	Número de pacotes com erros	Número de pacotes recebidos	Número de pacotes com erros
Isolador sem tensão	100	0	100	2
Isolador sem anel	250	0	250	6
Isolador com anel “pequeno”	250	0	250	0
Isolador com anel “grande”	250	0	250	0

6.3.2. Antenas Ominidirecionais

Neste ensaio, foram utilizadas antenas omnidirecionais, conforme relatado na metodologia. O intuito é realizar o experimento utilizando sensores com antenas de dimensões reduzidas, para assim poderem ser acopladas em uma linha de transmissão.

6.3.2.1. Análise da variação da portadora

Os gráficos das Figuras 144, 145 e 146 apresentam o sinal decorrente da transmissão com portadora centrada em 915 MHz, utilizando o isolador sem aplicação de tensão. Os gráficos das Figuras 147, 148 e 149 apresentam o sinal decorrente da transmissão utilizando o isolador sem anel anti-corona e com aplicação de tensão. Os gráficos das Figuras 150, 151 e 152 apresentam o sinal decorrente da transmissão utilizando o isolador com anel “pequeno” e com aplicação de tensão e os gráficos das Figuras 153, 154 e 155 apresentam o sinal decorrente da transmissão utilizando o isolador com anel “grande”.

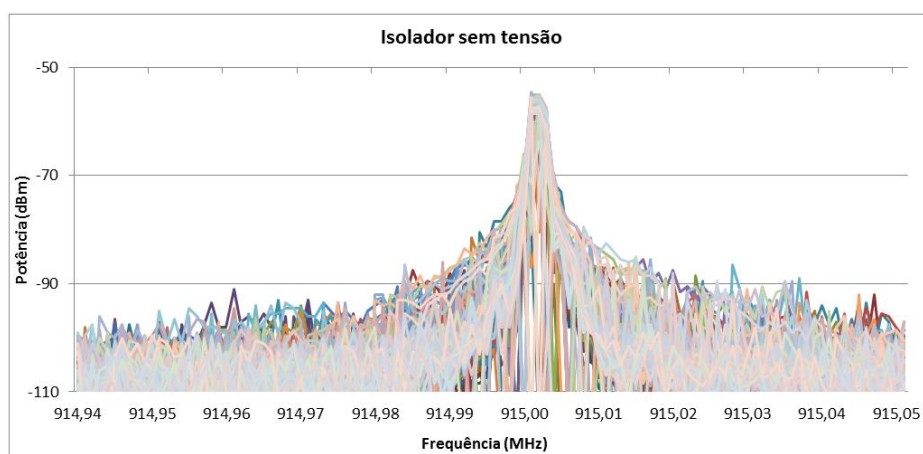


Figura 144. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 1)

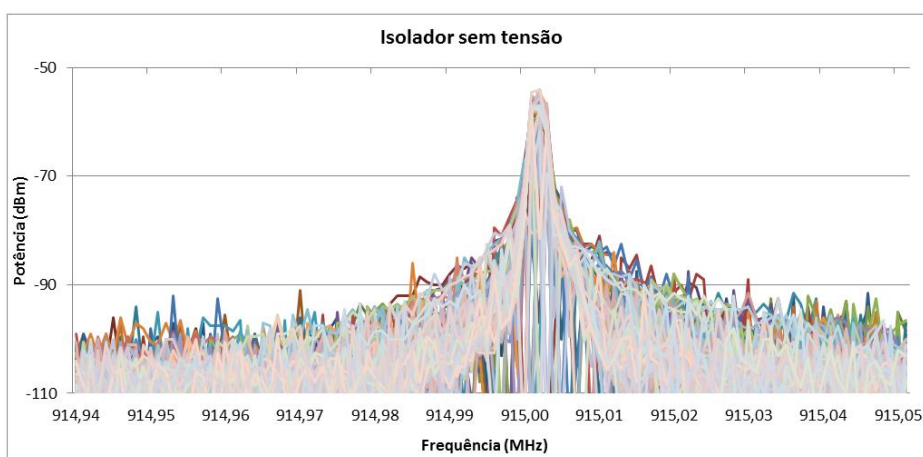


Figura 145. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 2)

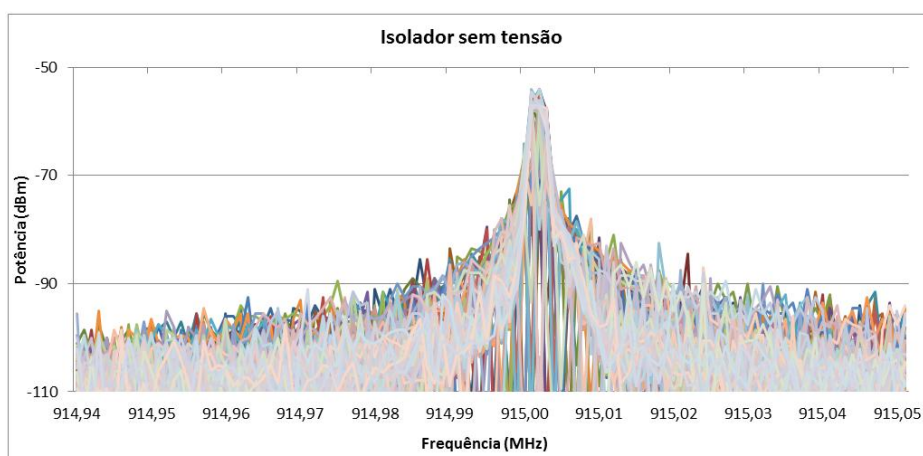


Figura 146. Sinal da transmissão utilizando o isolador sem tensão (parte 3)

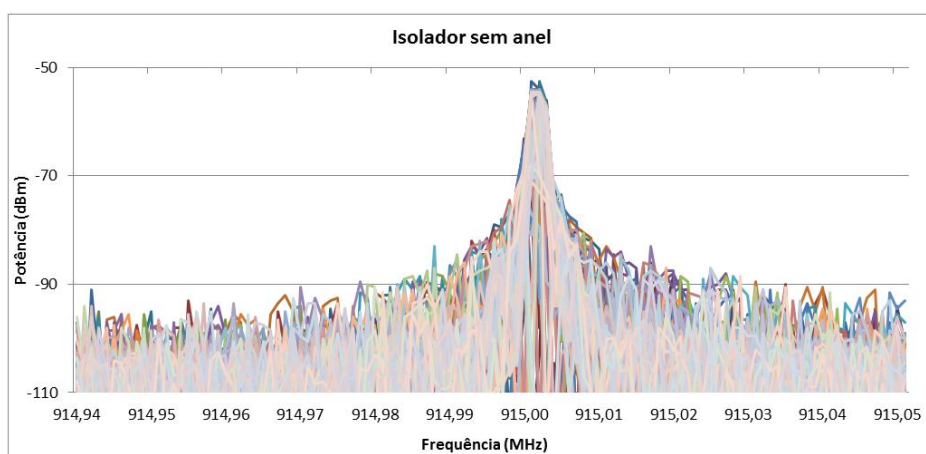


Figura 147. Sinal da transmissão utilizando isolador sem anel anti-corona (parte 1)

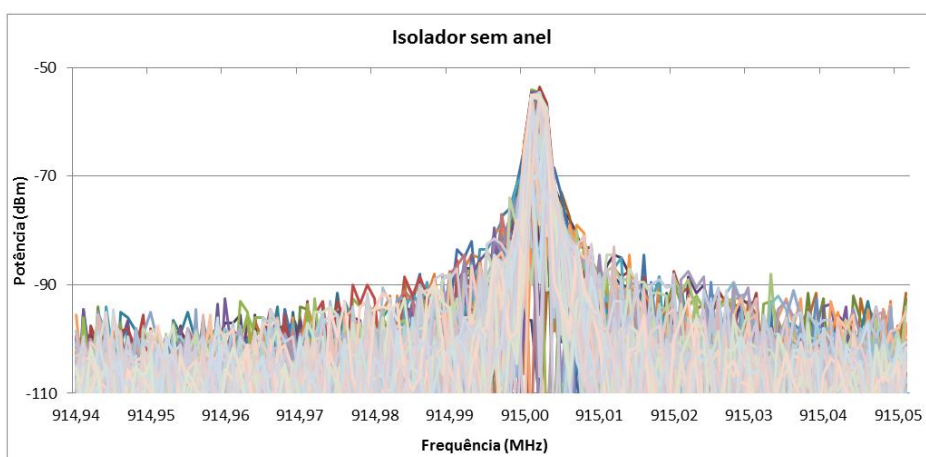


Figura 148. Sinal da transmissão utilizando isolador sem anel anti-corona (parte 2)

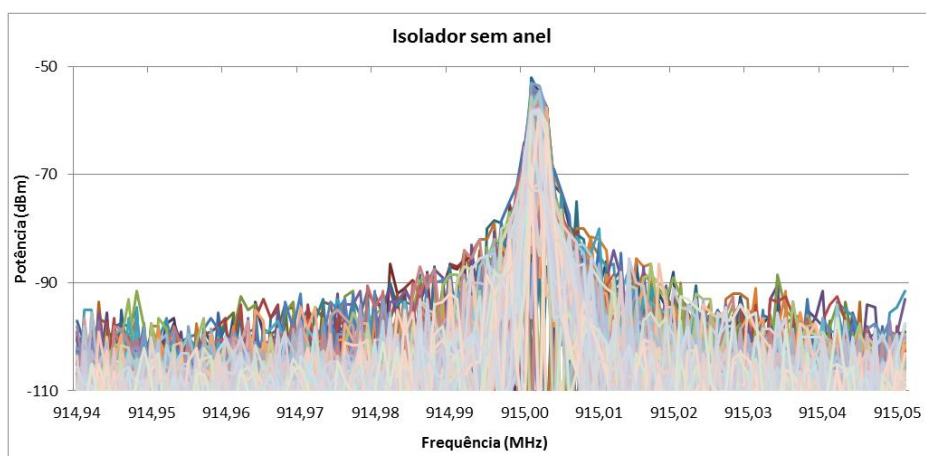


Figura 149. Sinal da transmissão utilizando isolador sem anel anti-corona (parte 3)

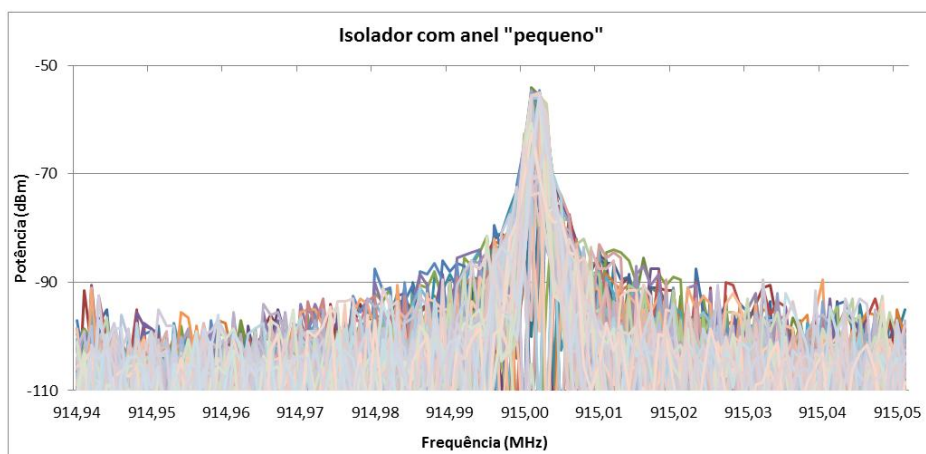


Figura 150. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel "pequeno" (parte 1)

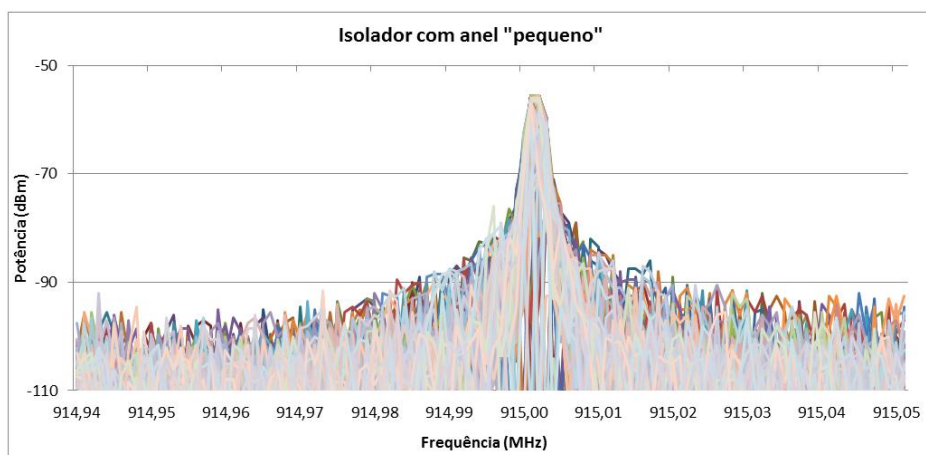


Figura 151. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel "pequeno" (parte 2)

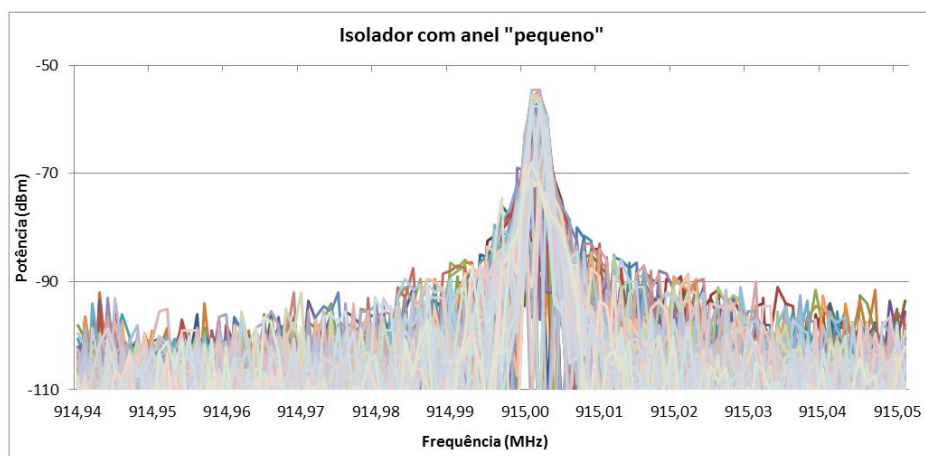


Figura 152. Sinal da transmissão utilizando isolador com anel "pequeno" (parte 3)

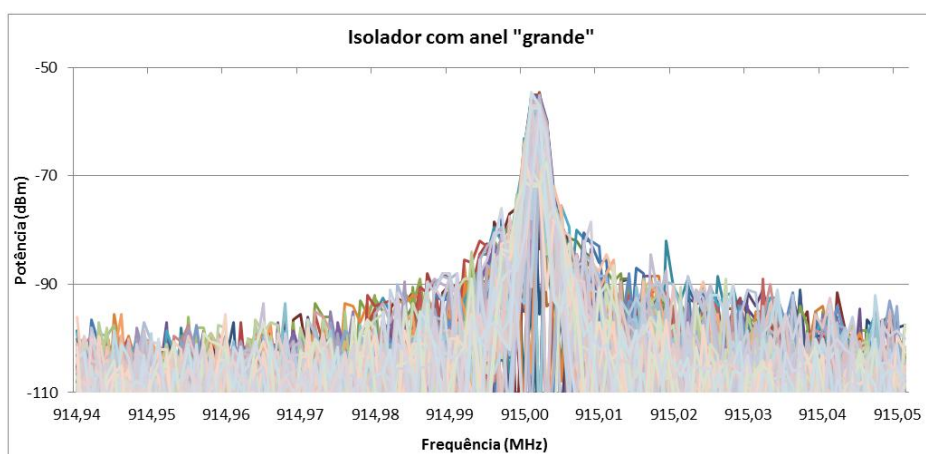


Figura 153. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel "grande" (parte 1)

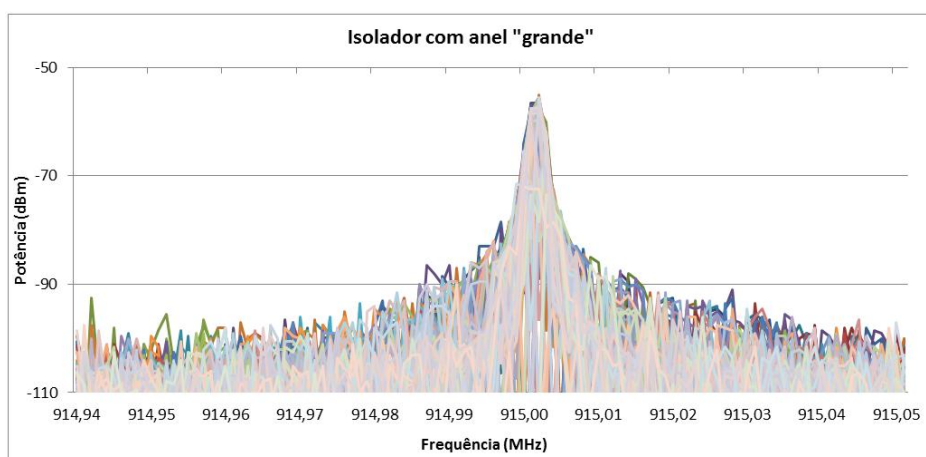


Figura 154. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel "grande" (parte 2)

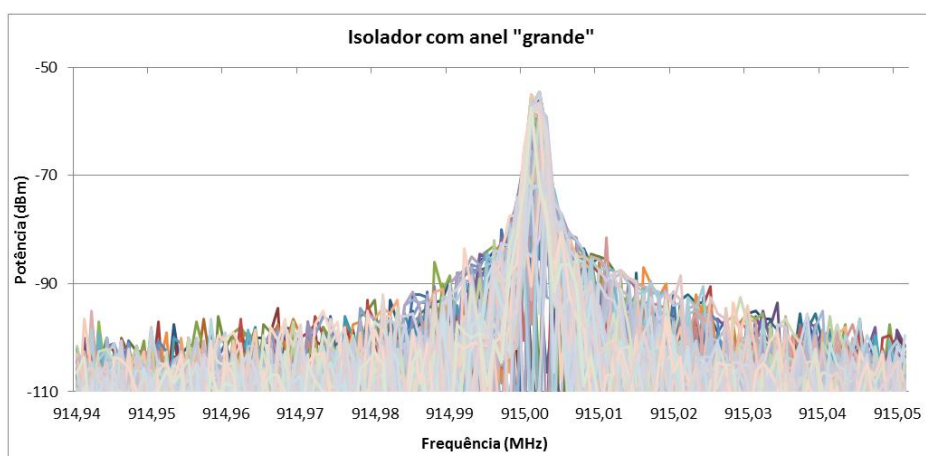


Figura 155. Sinal da transmissão utilizando o isolador com anel "grande" (parte 3)

6.3.2.2. Análise da RSSI e PER

Com a antena omnidirecional, também foi realizado a comunicação de dados utilizando dois sensores, empregando os mesmos procedimentos já informados. Os gráficos das Figuras 156, 157, 158 e 159 mostram a RSSI no sensor base (potência na transmissão) e no sensor receptor (potência na recepção) dos experimentos, utilizando o isolador sem tensão, isolador sem anel anti-corona (com tensão), isolador com anel “pequeno” (com tensão) e isolador com anel “grande” (com tensão) respectivamente.

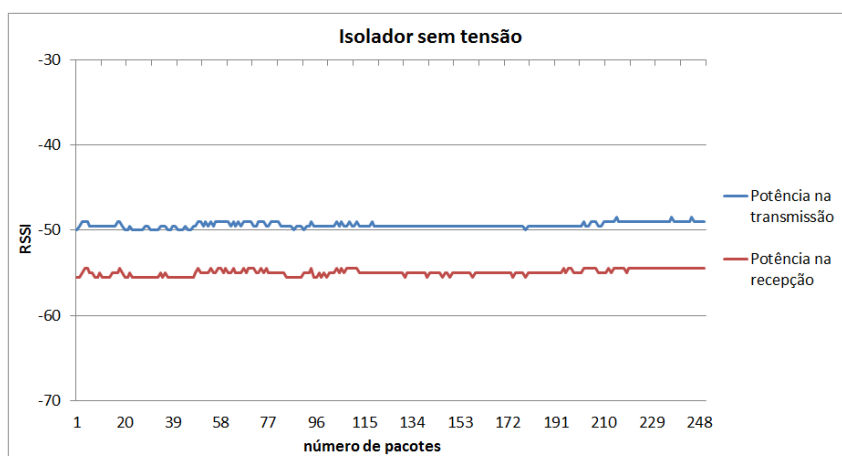


Figura 156. Dados do experimento isolador sem tensão

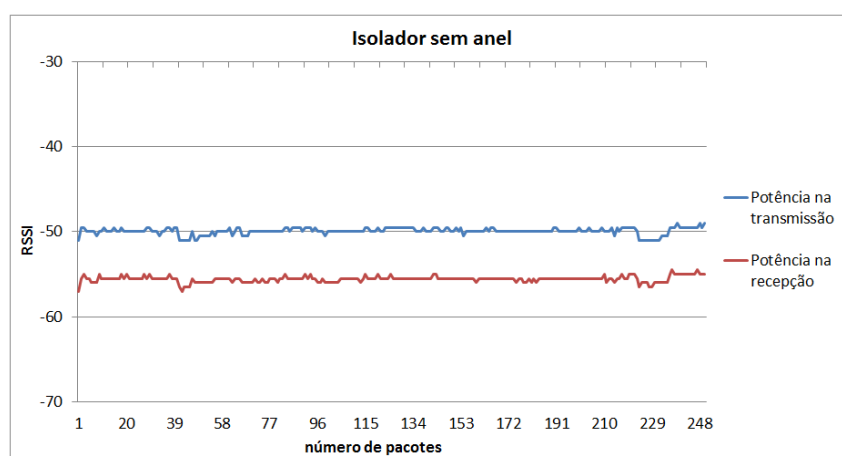


Figura 157. Dados do experimento isolador sem anel

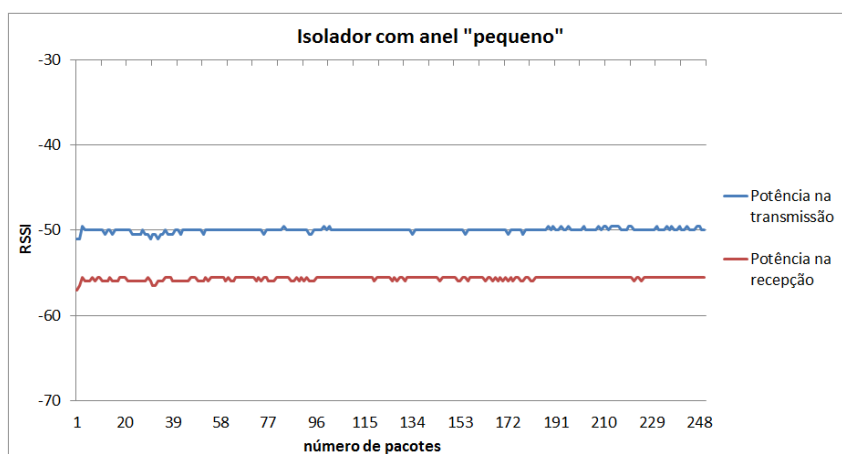


Figura 158. Dados do experimento isolador com anel “pequeno”

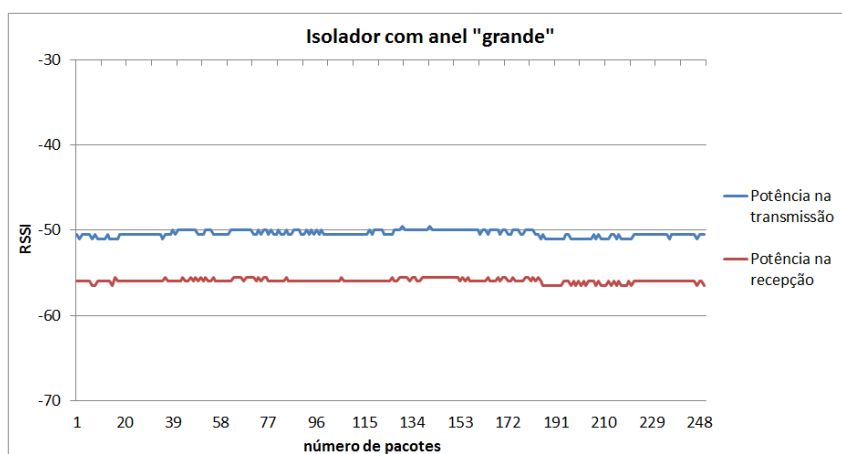


Figura 159. Dados do experimento isolador com anel “grande”

O número de pacotes transmitidos, recebidos e com erros durante o experimento é mostrado na Tabela 73. Número de pacotes na comunicação de dados.

Tabela 73. Número de pacotes na comunicação de dados

Configuração	Número de pacotes transmitidos	Número de pacotes com erros	Número de pacotes recebidos	Número de pacotes com erros
Isolador sem tensão	250	0	250	0
Isolador sem anel	250	0	250	1
Isolador com anel “pequeno”	250	0	250	0
Isolador com anel “grande”	250	0	250	0

6.3.3. Comparativo da variação da portadora

Com o intuito de comparar a variação da portadora (915 MHz) de uma determinada família de antenas, realizou-se a média dos sinais obtidos em 6.3.1.1. Análise da variação da portadora, utilizando antenas direcionais e em seguida a média dos sinais obtidos em 6.3.2.1. Análise da variação da portadora, utilizando antenas omnidirecionais.

O gráfico da média possui o intuito de verificar uma variação na frequência, por isto, foi possível utilizar a média dos sinais em dBm.

A Figura 160 apresenta a média dos sinais obtidos na transmissão de dados utilizando as antenas direcionais, conforme apresentada nas Figuras 127 a 138, enquanto que a Figura 161 apresenta a média dos sinais obtidos na transmissão de dados utilizando as antenas omnidirecionais, conforme apresentada nas Figuras 144 a 155.

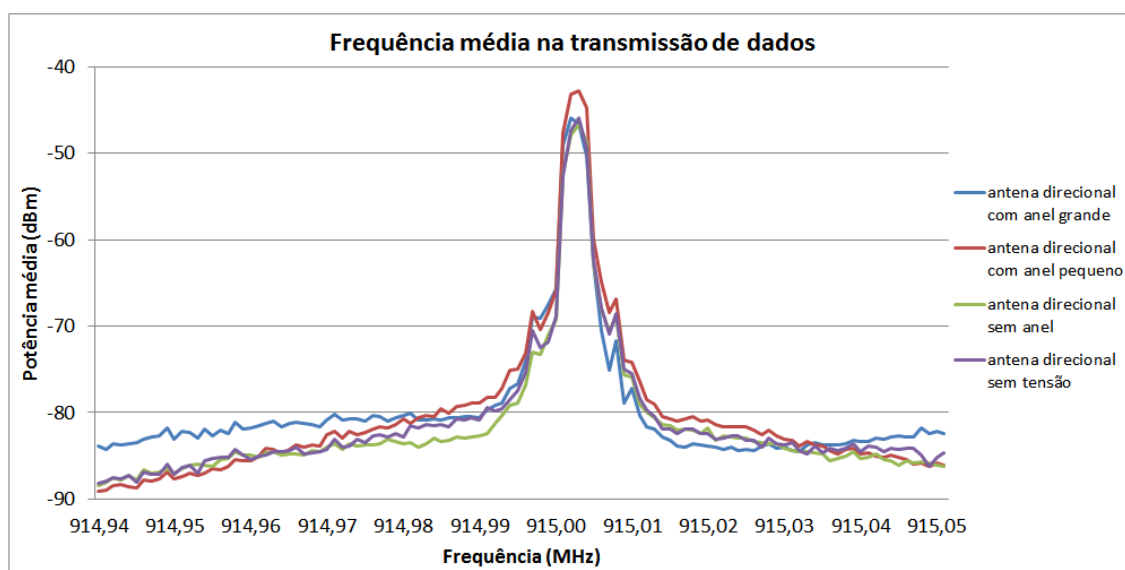


Figura 160. Sinal recebido utilizando antenas direcionais

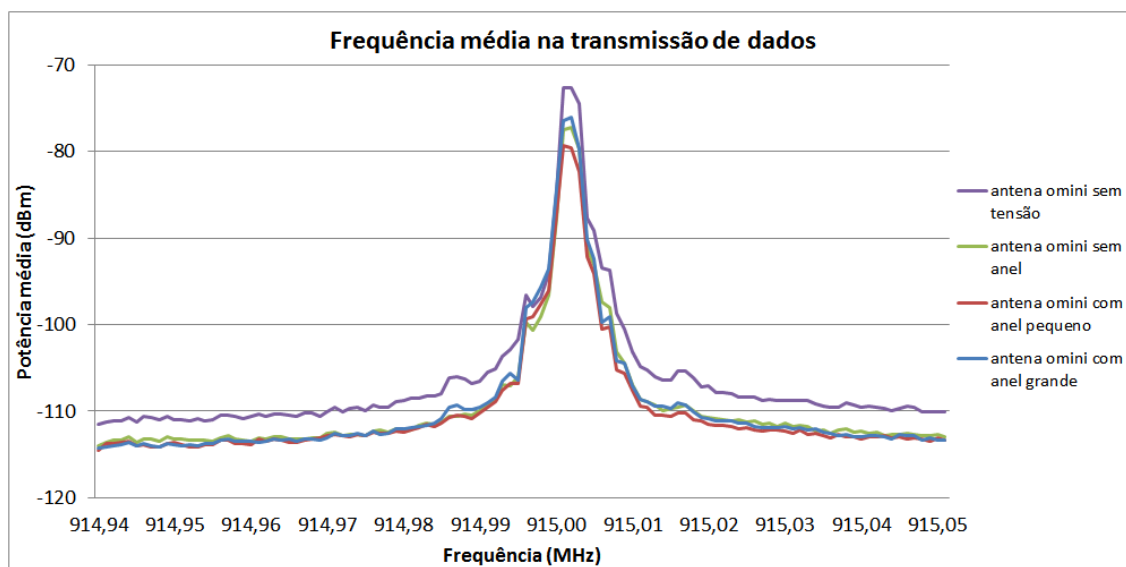


Figura 161. Sinal recebido utilizando antenas omnidirecionais

Nas Figuras 160 e 161, podemos observar que não ocorreu variação da variação da frequência central de 915 MHz, quando utilizamos antenas direcionais e antenas omnidirecionais.

6.3.4. Análise alterando a posição dos sensores

Realizando uma nova investigação, o sensor base foi colocado em uma posição a 1 metro do solo, enquanto que o outro sensor foi elevado a uma altura de 2 metros acima do ponto de tensão do isolador (terminal fase). Esta investigação foi realizada, pois em sua aplicação o sensor pode estar acima da linha de aplicação de tensão. Uma das possibilidades é estar acoplado junto ao terminal terra, enquanto que o outro sensor poderá estar na base da torre de transmissão. A Figura 162 mostra a posição dos sensores e do isolador.



Figura 162. Configuração do sistema

Foi realizada a transmissão de 250 pacotes, obtendo-se o gráfico da Figura 163.

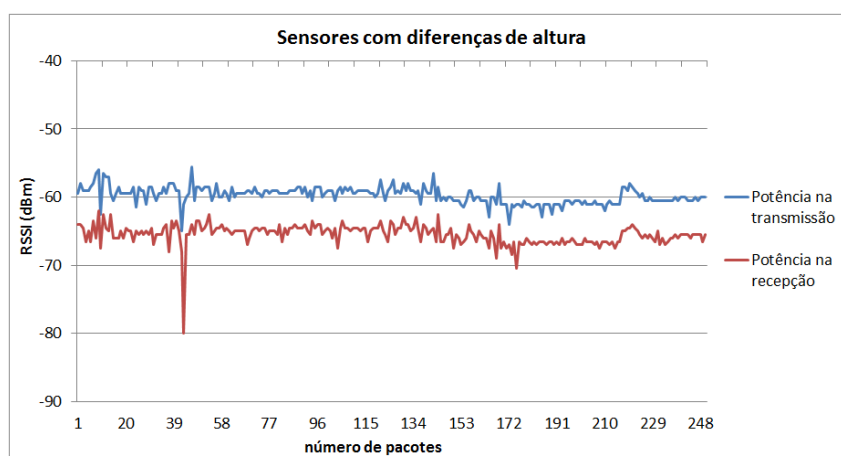


Figura 163. Dados do experimento isolador com anel grande

Dos 250 pacotes utilizados na comunicação desta investigação, nenhum pacote apresentou erro.

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram realizadas simulações utilizando *softwares* livres, para determinação da intensidade do campo elétrico em isoladores poliméricos da classe de tensão 500 kV, através do Método dos Elementos Finitos, variando as dimensões da geometria do anel anti-corona.

O comportamento deste campo elétrico foi determinado através de técnicas de identificação matemática e pelo Método dos Mínimos Quadrados. Dentre as famílias de modelos estudadas, a que apresentou o menor erro em relação às amostras utilizadas, provenientes das simulações, foi a Polinomial de Ordem 4. Neste sentido para diâmetro do tubo do condutor do anel anti-corona variando entre 1 e 17 centímetros, o melhor modelo estudado, é dado pela equação (66).

$$y = 50,48x^4 - 2440,4x^3 + 44639x^2 - 397033x + 2062569,2 \quad (66)$$

Onde: y = campo elétrico [V/m];

x = diâmetro do condutor do anel anti-corona [cm].

E, para o diâmetro do tubo do condutor do anel anti-corona maior que 17 e menor que 41 centímetros, o melhor modelo estudado, é dado pela equação (67).

$$y = 0,4127x^4 - 56,215x^3 + 2979,5x^2 - 78664x + 1157070 \quad (67)$$

Onde: y = campo elétrico [V/m];

x = diâmetro do condutor do anel anti-corona [cm].

Esta função foi então utilizada para determinar o nível da intensidade do campo elétrico no terminal fase do isolador quando utilizado o anel anti-corona com diâmetro do tubo condutor do anel anti-corona igual a 1,5 cm e 7,0 cm.

Com estes dois anéis foram gerados diferentes níveis de intensidade de campo elétrico, com o intuito de investigar o comportamento de um eventual sinal de dados que possa atravessar este campo elétrico.

Nesta investigação, o isolador também foi utilizado sem aplicação de tensão (com a condição de campo elétrico nulo) e também sem a utilização de anel anti-corona, ou seja, na condição de intensidade máxima de campo elétrico, determinada na simulação com intensidade igual a 4.619.449 V/m.

A comunicação de dados foi ensaiada utilizando sensores RFBee, padrão IEEE 802.15.4 e a plataforma Arduino, com antenas direcionais e omnidirecionais.

Com o intuito de verificar uma possível variação da frequência central da portadora, em função da intensidade do campo elétrico, foi utilizada inicialmente a antena direcional tendo a linha de visada passando pelo ponto de intensidade máxima do campo elétrico; posteriormente foram empregadas antenas omnidirecionais na qual a altura das mesmas estava alinhada com o ponto de maior intensidade do campo elétrico.

Com os dados assim obtidos, foi possível realizar a média dos sinais recebidos pelo analisador de espectro, com o objetivo de analisar uma possível variação da frequência central da portadora (915 MHz). Através das Figuras 160 e 161, que sintetiza a média dos sinais recebidos e apresentados anteriormente no Capítulo 6 - Resultados, é possível afirmar que para a configuração utilizando antenas direcionais e/ou omnidirecionais não ocorreu variação da frequência central da portadora (915 MHz).

Já em relação à etapa de comunicação de dados através de dois nós sensores, é possível observar que, para antenas direcionais, o sinal na transmissão possui uma RSSI média de -22, enquanto que na recepção este valor se situa em torno -25. Já com antenas omnidirecionais, estes valores são de -50 e -55, respectivamente.

A diferença entre o pico da Intensidade do Sinal Recebido (indicado pelo valor de RSSI) se dá na verdade em função da utilização das diferentes antenas, que possuem ganhos de potência diferentes em decorrência de suas diferenças construtivas; entretanto, para este estudo, é possível afirmar que a intensidade de campo elétrico não comprometeu a comunicação de dados entre os sensores.

O número de pacotes perdidos durante a comunicação foi baixo; em especial, quando o isolador possui anel anti-corona não ocorre nenhum evento de perda de pacote.

A maior porcentagem de pacotes perdidos (1,6 %) ocorre com a configuração utilizando antenas direcionais, com linha de visada passando pelo ponto de maior intensidade do campo elétrico e com o isolador sem utilização do anel anti-corona. Enquanto que em todos os casos quando utilizamos o anel anti-corona não ocorreu perdas de pacotes, com isto é possível inferir que o anel anti-corona ajuda a reduzir o número de pacotes, entretanto para uma conclusão definitiva sobre este assunto é necessário a realização de mais ensaios.

Já ao aumentar-se a diferença de altura entre os nós sensores, utilizando antenas omnidirecionais, ocorre atenuação do sinal; tal atenuação, entretanto, não comprometeu a comunicação entre os nós sensores.

Portanto é possível concluir que a frequência de 915 MHz pode ser satisfatoriamente utilizada para transmissão de dados, com nós sensores instalados em isoladores poliméricos da classe de tensão de 500 kV, uma vez que, em todos os testes realizados, o sinal sofreu pouca degradação quando submetido a diferentes níveis de intensidade do campo elétrico.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se destacar:

- Utilização de geometrias diferentes de anéis anti-corona e seus efeitos na intensidade do campo elétrico em isoladores;
- Determinação da intensidade máxima do campo elétrico na qual o isolador pode ser submetido sem apresentar danos;
- Comparativo entre a intensidade de campo elétrico em isoladores poliméricos e fabricados com vidro e/ou porcelana;
- Utilização de isoladores polimérico com sensores ópticos para medição de grandezas elétricas e transmissão via ZigBee;
- Análise da corrente de fuga do isolador como critério de envelhecimento do mesmo, com os dados sendo enviados via ZigBee.

8. REFEFÊNCIAS

ABNT. **NBR 5422 - PROJETO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - Procedimento**. Rio de Janeiro - RJ: ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985.

ABNT. **ABNT NBR 15121 - Isolador para alta-tensão - Ensaio de medição da radiointerferência**. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 2004. 8 p.

ACUSIM SOFTWARE. AcuSolve. **ACUSIM SOFTWARE**, 2010. Disponível em: <<http://www.acusim.com/html/acusolve.html>>. Acesso em: 11 janeiro 2012.

ADAMS, G. E. **The calculation of the radio interference level of transmission lines caused by corona discharges**. [S.l.]: AIEE Trans., v. 75, 1956. 411-419 p.

ADINA. ADINA. **ADINA**, 2012. Disponível em: <<http://www.adina.com/index.shtml>>. Acesso em: 10 janeiro 2012.

AGUIRRE, L. A. **Introdução À Identificação de Sistemas**. 3ª. ed. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2007. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8D7ML2/cristiano_ribeiro_ferreira_j_come.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 Outubro 2012.

AIRES, A. M. **Redes Inteligentes de Energia – Smart Grids. Ordem dos Engenheiros de Portugal**, 2009. Disponível em: <<http://www.ordemengenheiros.pt/oe/electrotecnica/Ant%c3%b3nio%20Aires%20Messias.pdf>>. Acesso em: 02 março 2010.

ALCÂNTARA, M. **Um Mapa do Mundo em Medição Inteligente. Rede Inteligente**, 2009. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2009/09/05/um-mapa-do-mundo-em-medicao-inteligente/>>. Acesso em: 29 março 2010.

ALCÂNTARA, M. EUA têm primeiro gerador verde de eletricidade movido a O2. **Rede Inteligente**, 2010. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/category/redes-inteligentes/>>. Acesso em: 25 março 2010.

ALCÂNTARA, M. GE no Un-Habitat da Onu. **Rede Inteligente**, 2010. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/tag/ge/>>. Acesso em: 25 maio 2010.

ALCÂNTARA, M. Smart grid apressa a chegada da 4G no Brasil. **Rede Inteligente**, 2010. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/tag/wimax/>>. Acesso em: 29 março 2010.

ALEODIN, D. Lei de Gauss – As duas primeiras Equações de Maxwell. **Física da Natureza**, 2012. Disponível em: <<http://naturezadafisica.com/2012/03/11/lei-de-gauss-as-duas-primeiras-equacoes-de-maxwell/>>. Acesso em: 12 agosto 2012.

ANEEL. Qualidade do Serviço. **ANEEL**, 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=79>>. Acesso em: 03 março 2010.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 398. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA**, 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010398.pdf>>. Acesso em: 13 Janeiro 2012.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 432. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA**, 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2011432.pdf>>. Acesso em: 11 Dezembro 2012.

ANEEL. ANEEL regulamenta medidores eletrônicos. **ANEEL**, 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=5903&id_area=90>. Acesso em: 11 Dezembro 2012.

ANEEL. Informações Técnicas. **ANEEL**, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=79&idPerfil=2>>. Acesso em: 1 outubro 2012.

ANSYS. ANSYS. **ANSYS**, 2012. Disponível em: <<http://www.ansys.com/>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

ARDUINO. Arduino Diecimila. **ARDUINO**, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDiecimila>>. Acesso em: 13 junho 2012.

AREND, E. R. **Estudo de aterramento em baixas frequências usando a formulação eletrocinética associada ao método de elementos finitos**. Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

ASSUMPÇÃO, R. M. D. **Avaliação do impacto em rede de sensores sem fio com utilização de sistema de rádio sobre fibra**. Campinas, SP: Dissertação PCU-Campinas, 2011.

ASYNC. Python na prática: Um curso objetivo de programação em Python. **ASYNC**, 2004. Disponível em: <<http://www.async.com.br/projects/python/pnp/node9.html>>. Acesso em: 16 janeiro 2012.

AUDILAB SOFTWARE. Cast3M. **AudiLab Software**, 2005. Disponível em: <<http://audilab.bmed.mcgill.ca/AudiLab/sw/cast3m.html>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

AUTODESK. Autodesk Simulation Mechanical and Multiphysics. **Autodesk**, 2012. Disponível em: <<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?siteID=123112&id=13773836>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

ÁVILA, F. A busca pela rede elétrica inteligente. **Tecnologia e Ciência**, 2010. Disponível em: <<http://www.zoonews.com.br/noticias2/noticia.php?idnoticia=157159>>. Acesso em: 11 Janeiro 2012.

AVILA, J. A. J. Introdução ao Método dos Elementos Finitos. **ERMAC 2010: I Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional**, São João del-Rei - MG, p. 65-89, novembro 2010.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1ª. ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. , 2003.

AZEVEDO, P. A. Como funciona a Internet? **nossacasa.net**, 2010. Disponível em: <<http://www.nossacasa.net/info/texto.asp?texto=12>>. Acesso em: 2 fevereiro 2012.

BAIXAKI. Como anda o avanço do Power Line Communication no Brasil. **Baixaki**, 2010. Disponível em: <<http://www.brazonline.com.br/tecnologia/internet%20energia%20eletrica.htm>>. Acesso em: 17 abril 2010.

BALANIS, C. A. **Teoria de Antenas: Análise e Síntese**. São Paulo, SP: Ltc, v. 1, 2009.

BALESTRO. Isoladores Poliméricos para Alta Tensão - Tipo IPB. **BALESTRO**, 2010. Disponível em: <http://www.balestro.com/web/isol_poli_trans.asp>. Acesso em: 10 setembro 2012.

BAPTISTA, M. C. P. **Identificação e Caracterização da Modulação dos Sinais digitais em RF**. [S.l.]: Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, 2008.

BARBOSA, W. O. V. Fluxo Magnético, Lei de Faraday e Lei de Lenz. **blog educacional**, 2012. Disponível em: <<http://blog.educacional.com.br/profwescley/files/fluxo-magnetico-lei-de-faraday-e-lei-de-lenz-1.pdf>>. Acesso em: 13 agosto 2012.

BELMIROW. **Notas de aula: 5 - LEI DE GAUSS**. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Curitiba, p. 8. 2012.

BIASOTTO, E. **Um procedimento de análise para a repotenciação de linhas de subtransmissão de 34,5 kV para 69 kV**. São Carlos - SP: UFSCAR, 2009.

BOAS, L. A. S. V. WiMax – A nova tecnologia de redes sem fio, 2007. Disponível em: <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CC4QFjAC&url=http%3A%2F%2Fbibdig.poliseducacional.com.br%2Fdocument%2F%3Fdown%3D27&ei=yj-QUMenG4WQ8wStn4C4Dg&usg=AFQjCNFo32T9BuyHC6BU-Q81yaO_oYM9XQ&sig2=fT-HzeTpccjROunsiDDAGA>. Acesso em: 22 fevereiro 2012.

BOCCUZZI, C. V. **“Smart Grid”**: O Projeto Eletropaulo. São Paulo - SP: Palestra apresentada na Abinee Tec 2007, 2007.

BONFIM, M. Medidas Elétricas. **UFPR – DELT**, 2003. Disponível em: <<http://www.eletr.ufpr.br/marlio/medidashf/apostila/apostila2a.pdf>>. Acesso em: 5 janeiro 2012.

BRITO, A. V. D. SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE VÍDEO PARA VIGILÂNCIA UTILIZANDO BLUETOOTH. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**, 2003. Disponível em: <http://docs.computacao.ufcg.edu.br/posgraduacao/dissertacoes/2003/Dissertacao_AlissonVasconcelosDeBrito.pdf>. Acesso em: 21 Junho 2011.

CAIRES, R. R. Método dos Elementos Finitos. **ebah**, 2009. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABi2AAA/metodo-dos-elementos-finitos>>. Acesso em: 11 janeiro 2012.

CAIRES, V. C.; ALMEIDA, H. P. Método dos Mínimos Quadrados. **Centro de Ciências Exatas e da Natureza/Departamento de Matemática**, 2012. Disponível em: <<http://www.prac.ufpb.br/anais/IXEnex/iniciacao/documentos/anais/4.EDUCACAO/4CCENDMMT02.pdf>>. Acesso em: 22 junho 2012.

CARDOSO, J. R. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. São Paulo - SP: Editoração própria, 1999.

CARVALHO, A. O que é GPRS – General Packet Radio Service? **Wireless Brasil**, 2010. Disponível em: <<http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/alancarvalho/gprs.html>>. Acesso em: 17 abril 2010.

CASTELA, R. T. Introdução a Linguagem PHP. **O que é o PHP?**, 2012. Disponível em: <<http://www.dotsharp.com.br/programacao/php/introducao-a-linguagem-php.html>>. Acesso em: 11 janeiro 2012.

CAU30 ELETRÔNICOS. Receptora para monitoramento de alarmes GPRS e 2 linhas ABS IP-Max2. **Loja Tray**, 2010. Disponível em: <http://loja.tray.com.br/loja/produto-48335-1692-receptora_para_monitoramento_de_alarmes_gprs_e_2_linhas_abs_ipmax2>. Acesso em: 02 abril 2010.

CEFET-PE. **Campo Magnético**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco - UNED - PESQUEIRA. Recife. 2012.

CEMIG. Alternativas Energéticas. **CEMIG**, 2011. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/Inovacao/AlternativasEnergeticas/Paginas/CidadesdoFuturo.aspx>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA. O campo magnético. **e-física - ensino de física on-line**, 2007. Disponível em: <http://efisica.if.usp.br/electricidade/basico/campo_magnetico/intro/>. Acesso em: 06 agosto 2012.

CHRISTINE. The Strategic Value of Smart Grid Investments, 2010. Disponível em: <<http://www.smartgridlibrary.com/2010/04/05/the-strategic-value-of-smart-grid-investments/>>. Acesso em: 1 maio 2010.

CIDE, P. Vocês sabem os significados dos indicadores DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC? **Professor Cide**, 2010. Disponível em:

<<http://profcide.blogspot.com.br/2010/11/voce-sabem-o-significa-dec-fec-dic-fic.html>>. Acesso em: 15 outubro 2012.

CNET NEWS. Investimento global em smart grids chegará a US\$ 46 bilhões até 2015. **Convergência Digital**, 2010. Disponível em: <<http://convergenciadigital.uol.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?inford=23123&sid=5>>. Acesso em: 11 Outubro 2010.

COMPUTERS & STRUCTURES. INC. SAP2000 Overview. **COMPUTERS & STRUCTURES. INC.**, 2012. Disponível em: <<http://www.csiberkeley.com/sap2000>>. Acesso em: 18 janeiro 2012.

COMSOL. COMSOL. **COMSOL**, 1998. Disponível em: <<http://www.comsol.com/>>. Acesso em: 15 janeiro 2012.

CONTROLS, J. Especialistas do setor explicam por que o interesse mundial em gerenciamento de energia está mais alto do que nunca. **smartgrid news**, 2012. Disponível em: <<http://smartgridnews.com.br/especialistas-do-setor-explicam-por-que-o-interesse-mundial-em-gerenciamento-de-energia-esta-mais-alto-do-que-nunca/>>. Acesso em: 19 Setembro 2012.

COSTA, G. Brasil quer rede inteligente para diminuir perda de energia. **EXAME.COM**, 2012. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/energia/noticias/brasil-quer-rede-inteligente-para-diminuir-perda-de-energia>>. Acesso em: 2012 junho 25.

DA SILVA, D. C. M. A Lei de Lenz. **MUNDO EDUCAÇÃO**, 2012. Disponível em: <<http://www.mundoeducacao.com.br/fisica/a-lei-lenz.htm>>. Acesso em: 13 agosto 2012.

DALLA, F. C. Empresa americana aposta na economia forte para implantar smart grid no Brasil. **Revista Sustentabilidade**, 2010. Disponível em: <<http://www.revistasustentabilidade.com.br/eficiencia-energetica/empresa-americana-aposta-na-economia-forte-para-implantar-smart-grid-no-brasil>>. Acesso em: 01 maio 2010.

DASSAULT SYSTEMES. Leading Technology for FEA, Design Optimization and Simulation Data Management. **Dassault Systemes**, 2002. Disponível em: <<http://www.3ds.com/products/simulia/overview/>>. Acesso em: 9 janeiro 2012.

DASSAULT SYSTEMES. SIMULIA. **Dassault Systemes**, 2002. Disponível em: <<http://www.3ds.com/products/simulia/overview/>>. Acesso em: 10 janeiro 2012.

DASSAULT SYSTEMES. SOLIDWORKS. **Dassault Systemes**, 2012. Disponível em: <<http://www.solidworks.com/sw/products/fea-cfd-simulation-software.htm>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

DAYCOR®. **The most Advanced Daytime corona Imager**. Catálogo DayCor®. [S.l.], p. 4. 2008.

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA. Projectos de mini-hídricas e de aerogeradores. **À Descoberta da Física**, 2007. Disponível em: <http://fisica.uc.pt/xf/z/ozone.php?args___=3.5.3.1.5.7.xvo&w=1&id_obj=b.0.0.8>. Acesso em: 2012 Junho 14.

DESMONTA&CIA. ZigBee ou IEEE 802.15.4 – Conheça a tecnologia a fundo. **Desmonta&CIA**, 2010. Disponível em: <<http://desmontacia.wordpress.com/2011/02/22/zigbee-ou-ieee-802-15-4-conheca-a-tecnologia-a-fundo/>>. Acesso em: 4 fevereiro 2012.

DIAS, A. R. Gestão de Energia Elétrica Pelo Lado da Demanda Empregando Arquitetura Orientada a Serviços sobre Tecnologias GPRS e PLC. **Zona Elétrica**, 2010. Disponível em: <<http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/ctee/simpase2009/documentos/IT%2047%20-%20Gest%C3%A3o%20Energia%20El%C3%A9trica%20Pelo%20Lado%20da%20Demanda%20Empregando%20Tecnologias%20GPRS%20e%20PLC.pdf>>. Acesso em: 4 abril 2010.

DIGITAL SATÉLITES. Chegou a nova Tecnologia GPRS. **Digital Satélites**, 2012. Disponível em: <<http://box-tudo.blogspot.com.br/2012/07/chegou-nova-tecnologia-para-receptores.html>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

DULAR, P.; GEUZAINÉ, C. **GetDP Reference Manual**. [S.l.]: University of Liège, 2009.

DULAR, P.; GEUZAINÉ, C. GetDP: a General Environment for the Treatment of Discrete Problems. **GEUZ**, 2012. Disponível em: <<http://geuz.org/getdp/>>. Acesso em: 13 agosto 2012.

EKLUND INFRARED INC. **Dear Electric Utility Professional; Innovation, Performance, Reliability, Excellence**. EKLUND INFRARED Inc. Marietta, EUA, p. 10. 2009.

ELEKTRON JUVENIL. O QUE É UM CAMPO MAGNÉTICO ? **Elektron juvenil**, 2012. Disponível em: <<http://www.geocities.ws/jcc5000/oqueecampomagnetico.html>>. Acesso em: 08 agosto 2012.

ELEPERUMA, K.; SAHA, T. K.; GILLESPIE, T. Electric Field Modelling of Non-Ceramic High Voltage. **itee**, Hobart, Tasmania, Australia, 2005. Disponível em: <<http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec06/htdocs/content/pdf/128.pdf>>. Acesso em: 11 Janeiro 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Consumo nacional de energia elétrica registra aumento de 9,1% em janeiro. **EPE**, 2010. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/20100224_1.pdf>. Acesso em: 28 março 2010.

ENGENHEIRANDO.COM. O que é? **engenheirando.com**, 2011. Disponível em: <<http://engenheirando.com/arduino/o-que-e/>>. Acesso em: 4 janeiro 2012.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Consumo nacional de energia elétrica por classe. **EPE**, 2009. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Consumo%20nacional%20de%20en>

ergia%20el%C3%A9trica%20por%20classe%20-%201995-2011.pdf>. Acesso em: 10 junho 2012.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Demanda de energia elétrica – 10 anos, 2009. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120104_3.pdf>. Acesso em: 10 junho 2012.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano decenal de expansão de energia 2020, 2009. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302_1.pdf>. Acesso em: 10 junho 2012.

FAGUNDES, E. M. Como funciona a Internet? **efagundes.com**, 2010. Disponível em: <<http://efagundes.com/artigos/Como%20funciona%20a%20INTERNET.htm>>. Acesso em: 14 janeiro 2012.

FERRARO, R.; DOHLEMAN, E. Corona Rings: Are They Needed? **TRANSMISSION & DISTRIBUTION WORLD**, 2010. Disponível em: <http://tdworld.com/overhead_transmission/polymer-insulator-failures-20100301/index1.html>. Acesso em: 25 janeiro 2012.

FIELD PRECISION. 3D Electromagnetic Field Calculations. **FIELD PRECISION**, 1998. Disponível em: <<http://www.fieldp.com/>>. Acesso em: 14 janeiro 2012.

FILHO, A. B. Campo elétrico. **Portal do Professor**, 2008. Disponível em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=775>>. Acesso em: 06 agosto 2012.

FÍSICA B. CAMPO MAGNÉTICO E FORÇA MAGNÉTICA. **FÍSICA UFS**, 2003. Disponível em: <http://www.fisica.ufs.br/apostilas/Fisica_B_Aula_7.PDF>. Acesso em: 12 agosto 2012.

FLACHMANN & HEGGELBACHER. Docklight Download. **Docklight**, 2012. Disponível em: <http://www.docklight.de/download_en.htm>. Acesso em: 15 junho 2012.

FLACHMANN & HEGGELBACHER. Docklight Scripting. **CNET DOWNLOAD.COM**, 2012. Disponível em: <http://download.cnet.com/Docklight-Scripting/3000-2085_4-10377841.html>. Acesso em: 16 junho 2012.

FLACHMANN, M.; HEGGELBACHER, O., 2012. Disponível em: <http://www.fuh-edv.de/index_en.htm>. Acesso em: 14 junho 2012.

FLEISCH, D. **A Student's Guide to Maxwell's Equations**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 146 p.

FOLHA ONLINE. Blecaute no Brasil. **FOLHA ONLINE**, 2010. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/especial/2009/blecautenobrasil/>>. Acesso em: 15 maio 2010.

GARCIA, R. W. S.; SANTOS FILHO, N. Isoladores de linha de transmissão do sistema elétrico brasileiro parte 1: inventário. **Décimo Encuentro Regional Latino Americano de la Cigré**, 2003.

GENERAL ELECTRIC CO. PROJECT EHV. **EHV Transmission Line Reference Book**. 2ª. ed. [S.l.]: Electric Power Research Institute, 1982.

GEUZ. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. **GEUZ**, 2012. Disponível em: <<http://geuz.org/gmsh/>>. Acesso em: 14 janeiro 2012.

GEUZAINÉ, C.; REMADE, J. F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. **GEUZ**, 2012. Disponível em: <<http://geuz.org/gmsh/>>. Acesso em: 13 agosto 2012.

GEUZINE, C.; REMADE, J. F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. **GEUZ**, 2012. Disponível em: <<http://geuz.org/gmsh/>>. Acesso em: 11 agosto 2012.

GIANCCHINI, B. L. **Uma breve introdução ao método dos elementos finitos**. Belo Horizonte - MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

HALLIDAY, D. . R. R. . W. J. **Fundamentos de Física – Vol. 3: Eletromagnetismo**. 8ª. ed. São Paulo - SP: LTC, 2009. 394 p.

HAMOUIZ, Z. A. Finite element computation of corona around monopolar transmission lines, v. 48, p. 57-63, 1998.

HEINRICH, O. **Corona Measuring Techniques and Their Use in Insulation System - Evaluation**. [S.l.]: IEEE Transactions on Component Parts, v. 11, 1964. 299 – 316 p.

HTML4BLOG. Como funciona a Internet. **HTML4blog**, 2010. Disponível em: <http://www.emblema.art.br/html4blog/azul_internet.htm>. Acesso em: 15 janeiro 2012.

IBM. CPFL é a primeira empresa da América Latina a integrar grupo mundial da IBM que discute Smartgrid. **IBM**, 2010. Disponível em: <<http://www-03.ibm.com/press/br/pt/pressrelease/28503.wss>>. Acesso em: 18 abril 2010.

IBM. IBM Teams With CPFL to Create a Smarter Energy Network in Brazil. **IBM**, 2011. Disponível em: <<http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/34934.wss>>. Acesso em: 8 janeiro 2012.

İLHAN, S.; ÖZDEMİR, A. EFFECTS OF CORONA RING DESIGN ON ELECTRIC FIELD INTENSITY AND POTENTIAL DISTRIBUTION ALONG AN INSULATOR STRING. **emo**, 2008. Disponível em: <http://www.emo.org.tr/ekler/43098afe85a1d30_ek.pdf>. Acesso em: 14 Janeiro 2011.

INTEGRATED ENGINEERING SOFTWARE. COULOMB. **INTEGRATED ENGINEERING SOFTWARE**, 2012. Disponível em: <<http://www.integratedsoft.com/Products/Coulomb>>. Acesso em: 12 janeiro 2012.

ISTHMUS E-COMMERCE. Bússola de Agulha. **Loja Virtual do Pacote Flex - Isthmus E-Commerce**, 2012. Disponível em: <http://www.isthmus.com.br/lojaflex/geringoncas-para-orientacao/geolocalizadores/bussola-de-agulha-/1-231/centro_detalhes.aspx>. Acesso em: 09 agosto 2012.

ITRÓN. Casos de Sucesso do Setor de Rede Inteligente (Smart Grid). **Itrón**, 2012. Disponível em: <<https://www.itron.com/brasil/pt/solutions/Pages/Smart-Grid-Success-Stories.aspx>>. Acesso em: 22 julho 2012.

JACKSON, M. SmartSynch Introduces ANSI GPRS Residential Smart Meter. **SmartSynch**, 2010. Disponível em: <<http://www.smartsynch.com/news/020407.htm>>. Acesso em: 21 abril 2010.

JADJISKI, D. Smart Grid: chave para eficiência. **Especial CanalEnergia 2010/2011**, 2011. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Retrospectiva.asp?id=77234&a=2010>>. Acesso em: 5 maio 2012.

JARDINI, J. A. et al. **Alternativas Não Convencionais para Transmissão de energia Elétrica Estado da Arte**. Brasília - DF: Eletrobrás, v. I, 2011. 447 p.

JATOBÁ, P. ABINEE. **Visão Geral do Smart Grid**, 2007. Disponível em: <<http://www.tec.abinee.org.br/2007/arquivos/s1701.pdf>>. Acesso em: 04 março 2010.

JUNIO, A. O que é Fibra Ótica e como funciona? **OFICINA DA NET**, 2012. Disponível em: <<http://www.oficinadanet.com.br/artigo/redes/o-que-e-fibra-otica-e-como-funciona>>. Acesso em: 11 junho 2012.

KARASINSKI, E. Power line Communication: a rede na tomada. **BAIXAKI**, 2010. Disponível em: <<http://www.baixaki.com.br/info/3068-power-line-communication-a-rede-na-tomada.htm>>. Acesso em: 24 abril 2010.

KELLY, R. Electric Light & Power, 2006. Disponível em: <http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-25437853_ITM>. Acesso em: 25 março 2010.

KLIPPEL, N. The influence of high-voltage pulse parameters on corona current in electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, v. 49, p. 31-49, 2000.

KNIGHT, P. T. BPL/PLC e Smart Grid – Sinais de vida. **Rede Inteligente**, 2009. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2009/08/01/bplplc-e-smart-grid-%E2%80%93-sinais-de-vida/>>. Acesso em: 3 abril 2010.

KOCHHANN, K. B. **Sistema de Telemetria Automotiva para Baja SAE UPF**. Passo Fundo - RS: Universidade de passo fundo; , 2009.

LEÃO, R. M. **Rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008. 146 p.

LEÃO, R. M. **Rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão**. 1ª. ed. Porto Alegre - RS: EDIPUCRS, 2008. 146 p.

LEITHOLD, A. A. O que é uma antena e o que é um lóbulo da antena, como é que se pode confeccioná-los?, 2012. Disponível em: <http://www.feirinhadigital.com.br/rbr/artigos-tecnicos/py5aal/L%C3%B3bulos_py5aal.pdf>. Acesso em: 15 junho 2012.

LIMA, C. A. F.; JANNUZZI, G. M. Capítulo VI – Smart Grid será realidade em seu potencial com o envolvimento do órgão regulador e com compromissos com o consumidor. **Smart grids – Redes Inteligentes**, 2012. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed70_fasciculo_smart_grids_cap6.pdf>. Acesso em: 11 outubro 2012.

LIN, J. ZigBee Smart Energy. **EETD SEMINAR**, 2009. Disponível em: <<http://eetdseminars.lbl.gov/download/042309-EETD-Seminar.pdf>>. Acesso em: 4 abril 2010.

LONTOH, S. “Smart Grid” Gets Smarter as Trilliant Surpasses Delivery of 750,000 Intelligent Devices. **Trilliant**, 2008. Disponível em: <<http://www.elp.com/articles/2007/10/demanding-standards-hydro-one-aims-to-leverage-ami-via-interoperability.html>>. Acesso em: 19 Junho 2010.

LOPES, F. P.; GONZALEZ, M. K. Smart Grid: Redes Elétricas Inteligentes. **Template para os artigos sobre os ensaios**, 2010. Disponível em: <<http://dc247.4shared.com/doc/6ldtwfX7/preview.html>>. Acesso em: 10 junho 2010.

LOPES, Y. et al. Minicurso para o SBrT'2012: Smart Grid e IEC 61850: Novos Desafios em Redes e Telecomunicações para o Sistema Elétrico;. **XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**;, 2012. Disponível em: <http://sbrt.org.br/sbrt2012/publicacoes/99346_1.pdf>. Acesso em: 13 outubro 2012.

LOTTI, R. S. **A influência do posicionamento da alça segmentada em “T” durante o movimento de retração inicial**: uma avaliação pelo método dos elementos finitos. Belo Horizonte - MG: Dissertação (Mestrado em Ortodontia) - Faculdade de Odontologia, 2003.

MACHADO, R. Comunicação de Dados. **UFSM**, 2010. Disponível em: <<http://www.ufsm.br/gpscom/professores/Renato%20Machado/ComunicacaoDeDados/ComDados11.pdf>>. Acesso em: 15 janeiro 2012.

MACHADO, R. Tópicos Avançados. **UFSM**, 2010. Disponível em: <<http://www.ufsm.br/gpscom/professores/Renato%20Machado/TopicosAvancados/TopAvanTelecom13.pdf>>. Acesso em: 14 janeiro 2012.

MAGSOFT CORPORATION. Flux2D. **MAGSOFT Corporation**, 2012. Disponível em: <<http://magsoft-flux.com/products/flux>>. Acesso em: 5 janeiro 2012.

MALAGONI, J. A. **Os elementos finitos no estudo de eletromagnetismo utilizando os software Gmsh/GetDP**. Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

MANARA, C. A. **Isoladores poliméricos – Balestro**. Indústria Eletromecânica Balestro Ltda. Mogi-Mirim - SP, p. 35. 2012.

MARIANO RE. GMSH: Gerador de Mallas, 2011. Disponível em: <http://materias.fi.uba.ar/7538/material/MiniTutorialGMSH_v1-1.pdf>. Acesso em: 14 junho 2012.

MARQUES, D. Campo magnético. **Brasil ESCOLA**, 2002. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/fisica/campo-magnetico.htm>>. Acesso em: 07 agosto 2012.

MARTINS, L. C. Magnetismo. **Mundo Físico**, 2004. Disponível em: <<http://www.mundofisico.joinville.udesc.br/index.php?idSecao=8&idSubSecao=&idTexto=217>>. Acesso em: 07 agosto 2012.

MARTINS, R. A. O Eletromagnetismo no século XIX. **GHTC-USP**, 2012. Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/server/HFIS/histfis-i9.pdf>>. Acesso em: 10 agosto 2012.

MARZO, G. R. **Aplicação do método dos elementos finitos na análise de tensões induzidas em cabos umbilicais**. São Paulo - SP: Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas., 2010.

MAURÍCIO, J. S. P. As Redes com ZigBee. **Eletronica**, 2010. Disponível em: <<http://www2.eletronica.org/artigos/eletronica-digital/as-redes-com-zigbee>>. Acesso em: 24 abril 2010.

MC GUINNESS, N. E. A. Stresses induced by edgewise appliances in the periodontal ligament: a finite element study. **Angle Orthod**, Appleton, janeiro 1992. 15-22.

MCMILLAN, F. O. **Radio Interference from Insulator Corona**. [S.l.]: Electrical Engineering (AIEE Transactions), v. 51, 1932.

MELLO, D. R. **Avaliação de ensaios de radiointerferência e corona visual em cadeias de isoladores**. Palestra ministrada em Furnas. [S.l.]. 2007.

MELLO, D. R.; CARDOSO, J. A. F. S.; GONÇALVES, P. P. Avaliação do desempenho de cadeias de isoladores para linhas de transmissão quanto à radiointerferência. **SBSE 2010**, 2010. Disponível em: <<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/III%20SBSE%20-%202010/PDF/SBSE2010-0111.PDF>>. Acesso em: 11 setembro 2012.

MELONI, E. M.; ANDREOLLI, M. C.; KOBAYASHI, M. K. **Corrosão por corona em isoladores de disco de vidro temperado**. Rio de Janeiro - SP: Colóquio sobre isoladores CEPEL 1997, 1997.

MENDES, G. Potencial Elétrico. **professorguilherme.net**, 2012. Disponível em:

<http://www.professorguilherme.net/aprenda_fisica_arquivos/05%20eletromagnetismo/eletrostatica/Potencial%20Eletrico.htm>. Acesso em: 06 agosto 2012.

MENDONÇA, P. L. et al. **Monitoramento de Isoladores Poliméricos em Linhas de Transmissão através de Sensor de Corrente de Fuga**. [S.I.]: SBSE, 2010.

MESSIAS, A. F. EDIFÍCIOS “INTELIGENTES”: A DOMÓTICA APLICADA À REALIDADE BRASILEIRA. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**, 2007. Disponível em:

<<http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2007/ALAN%20%20MESSIAS.pdf>>. Acesso em: 18 Fevereiro 2012.

MICROSOFT. Excel 2010. **Office**, 2012. Disponível em: <<http://office.microsoft.com/en-us/excel/>>. Acesso em: 13 agosto 2012.

MIDDLETON, J.; JONES, M. L.; WILSON, N. A. Three-dimensional analysis of orthodontic tooth movement. **J Biomed Eng**, Surrey, julho 1990. 319-327.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. GT estudará implantação de Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente. **Ministério de Minas e Energia**, 2010. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/mme/noticias/destaque1/destaque_093.html>. Acesso em: 10 janeiro 2012.

MIRANDA, G. C. **Uma Contribuição ao Estudo do Efeito Corona em Linhas de Transmissão Utilizando o Método de Elementos Finitos**. Campinas - SP: UNICAMP, 2004.

MIRANDA, G. C. D. **Uma contribuição ao estado do efeito corona em linhas de transmissão utilizando o método de elementos finitos**. Campinas - SP: Universidade Estadual de Campinas, 1994.

MONTEIRO, J. **ZigBee – Uma abordagem prática**. [S.I.]: Universidade do Algarve, 2009.

MSC SOFTWARE. Actran Acoustics. **MSC Software**, 2011. Disponível em: <<http://www.mscsoftware.com/france/Products/CAE-Tools/Actran-Acoustics.aspx>>. Acesso em: 11 janeiro 2012.

MSC SOFTWARE. MD Nastran / Patran. **MSC Software**, 2011. Disponível em: <http://www.mscsoftware.com/university/software_bundles/patran_nastran.cfm>. Acesso em: 9 janeiro 2012.

MSC SOFTWARE. Adams. **MSC Software**, 2012. Disponível em: <<http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>>. Acesso em: 9 janeiro 2012.

MUÑOZ, H. A. A. **AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE REDES SEM FIO WI-FI E BLUETOOTH SOBRE UMA REDE BACNET/IEEE 802.15.4**. BRASÍLIA: FACULDADE DE TECNOLOGIA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2009.

MUÑOZ, H. A. A. **Avaliação da Interferência de Redes sem fio Wi-Fi e Bluetooth sobre uma rede BACNET/IEEE 802.15.4**. Brasília - DF: Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica, 2009.

NATIONALGRID. nationalgrid. **nationalgrid**, 2010. Disponível em: <<https://www1.nationalgridus.com/CorporateHub>>. Acesso em: 12 junho 2010.

NEI. Smart Grid: os benefícios da rede inteligente. **ENERGIA**, 2011. Disponível em: <<http://www.nei.com.br/artigos/smart+grid+os+beneficios+da+rede+inteligente.html>>. Acesso em: 14 Janeiro 2012.

NERI, M. G. G. et al. Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos. **EPIM2005**, 2005. Disponível em: <<http://epim2005.fing.edu.uy/trabajos/p42.pdf>>. Acesso em: 30 agosto 2012.

NIGRI, A. I. Desempenho de Linhas de Transmissão. Ponto de Vista da Manutenção. **XV-SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Foz do Iguaçu - PR, 1999.

NISA. HOME. **NISA**, 2011. Disponível em: <<http://nisasoftware.com/>>. Acesso em: 12 janeiro 2012.

OLHAR DIGITAL. Medição de energia elétrica ganha toque tecnológico. **Olhar Digital**, 2010. Disponível em: <http://olhardigital.uol.com.br/produtos/central_de_videos/medicao-de-energia-eletrica-ganha-toque-tecnologico>. Acesso em: 13 fevereiro 2011.

ORDOÑEZ, R. Consumo de energia elétrica no país bate recorde histórico. **O Globo**, 2010. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/mat/2010/02/02/consumo-de-energia-eletrica-no-pais-bate-recorde-historico-915769583.asp>>. Acesso em: 28 março 2010.

PAULA, J. Smart Grid apressa a chegada da 4G no Brasil. **e-thesis**, 2010. Disponível em: <http://www.e-thesis.inf.br/index.php?option=com_content&task=view&id=6753&Itemid=117>. Acesso em: 11 junho 2012.

PEEK, F. W. **Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering**. [S.l.]: McGraw Hill, 1915.

PHP GROUP. PHP. **PHP**, 2001. Disponível em: <<http://www.php.net/>>. Acesso em: 12 janeiro 2012.

PIMENTA, R. II Seminário Internacional de Smart Grid será no CPqD. **SEGS**, 2010. Disponível em: <http://www.segs.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=7368:ii-seminario-internacional-de-smart-grid-sera-no-cpqd&catid=48:info-ti&Itemid=329>. Acesso em: 29 março 2010.

PINEDO, C. J. Q. **Séries de Potência + Equações Diferenciais**. Tocantins: Universidade Federal do Tocantins, 2010.

PINHEIRO, J. M. S. As Redes com ZigBee. **eletronica.org**, 2010. Disponível em: <<http://www2.eletronica.org/artigos/eletronica-digital/as-redes-com-zigbee>>. Acesso em: 23 fevereiro 2011.

PINHEIRO, J. M. S. As Redes com ZigBee. **eletronica.org**, 2010. Disponível em: <<http://www2.eletronica.org/artigos/eletronica-digital/as-redes-com-zigbee>>. Acesso em: 25 janeiro 2012.

PORTAL FÍSICA. Capítulo 22 – Lei de. **PORTAL FÍSICA**, 2012. Disponível em: <<http://www.portalfisica.com/uploads/6/9/5/4/6954454/gauss.pdf>>. Acesso em: 11 agosto 2012.

PORTAL SÃO FRANCISCO. bussola-47. **PORTAL SÃO FRANCISCO**, 2012. Disponível em: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/bussola/imagens/bussola-47.jpg>>. Acesso em: 07 agosto 2012.

PROELETRONIC. Antenas GSM 900 MHz. **ProEletronic**, 2008. Disponível em: <<http://www.proeletronic.com.br/v3/arquivos/produtos/102.pdf>>. Acesso em: 19 abril 2012.

PROELETRONIC. Antena Celular CDMA/TDMA 800 MHz 20 dBi. **ProEletronic**, 2012. Disponível em: <<http://www.proeletronic.com.br/produtos/antena-celular-cdma-tdma-800mhz-20-dbi/3/4>>. Acesso em: 18 abril 2012.

PROELETRONIC. Antenas CDMA/TDMA 800 MHz. **ProEletronic**, 2012. Disponível em: <<http://www.proeletronic.com.br/v3/arquivos/produtos/195.pdf>>. Acesso em: 18 abril 2012.

PROELETRONIC. PROELETRONIC. **PROELETRONIC**, 2012. Disponível em: <<http://www.proeletronic.com.br/v3/conteudo.php?area=inicial>>. Acesso em: 15 março 2012.

PROVATIDIS, C. A comparative FEM-study of tooth mobility using isotropic and anisotropic models of the periodontal ligament. **Med EngPhys**, Oxford, junho 2000. 359-370.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. History and License. **Phyton**, 1990. Disponível em: <<http://docs.python.org/license.html>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Download. **Python**, 2012. Disponível em: <<http://www.python.org/getit/>>. Acesso em: 15 junho 2012.

QUICKFIELD. Simulation software for electromagnetics, heat transfer and stress analysis. **QuickField**, 2012. Disponível em: <<http://quickfield.com/>>. Acesso em: 14 janeiro 2012.

R7. Efeito Corona (Fogo-de-Santelmo). **Site de Curiosidades**, 2011. Disponível em: <<http://www.sitedecuriosidades.com/curiosidade/efeito-corona-fogo-de-santelmo.html>>. Acesso em: 10 setembro 2012.

RADIOIT STORE. Módulo RFBee V1.1. **Radioit Store**, 2012. Disponível em: <<http://spreadcom.webstorelw.com.br/products/rfbee>>. Acesso em: 11 janeiro 2012.

REDE INTELIGENTE. Um mapa do mundo em medição inteligente. **Rede Inteligente**, 2009. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2009/09/05/um-mapa-do-mundo-em-medicao-inteligente/>>. Acesso em: 29 Setembro 2010.

REDE INTELIGENTE. AES Eletropaulo implanta projeto piloto de smart grid. **Rede Inteligente**, 2011. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2011/07/02/aes-eletropaulo-implanta-projeto-piloto-de-smart-grid/>>. Acesso em: 13 fevereiro 2012.

REDE NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA. O que é Wi-Max? **RNP**, 2010. Disponível em: <<http://www.rnp.br/noticias/2005/not-050927-coord.html>>. Acesso em: 2 maio 2010.

REIS, M. N. E. **Fenômenos de Transporte**. Poços de Caldas - MG: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2008.

RF EXPLORER. RF Explorer. **RF Explorer**, 2012. Disponível em: <http://micro.arochooll.com/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=61>. Acesso em: 2 junho 2012.

RF EXPLORER. RF Explorer Handheld Spectrum Analyzer – Open source PC Windows Client and other tools. **RF Explorer**, 2012. Disponível em: <<http://code.google.com/p/rfexplorer/>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

RIBEIRO, F. L. B. **Notas de aula. “Introdução ao Método dos Elementos Finitos”**. Rio de Janeiro - RJ: COPPE / UFRJ, 2007.

RICCI, M. C.; TAVARES, A. G. S. **Método dos elementos finitos**. São José dos Campos - SP: Instituto nacional de pesquisas espaciais – Engenharia e tecnologia espaciais – Mecânica espacial e controle – Mestrado, 2005.

SAMESHIMA, G. T.; MELNICK, M. Finite element-based cephalometric analysis. **Angle Orthod**, Appleton, 1994. 343-350.

SCHÜMANN, U. et al. FEM Calculation and Measurement of the Electrical Field Distribution of HV Composite Insulator Arrangements. **39th CIGRE Session**, Paris, France, Agosto 2002.

SCHUMANN, U. et al. **FEM Calculation and Measurement of the Electrical Field Distribution of HV Composite Insulator Arrangements**. Germany: Institute for High Voltage and Electrical Power Apparatus, 2009.

SEED WIKI. RFBee V1.1 – Wireless Arduino compatible node. **seed Wiki**, 2012. Disponível em: <http://www.seeedstudio.com/wiki/RFbee_V1.1_-_Wireless_Arduino_compatible_node>. Acesso em: 22 junho 2012.

SEEED STUDIO WORKS. RFBee User Manual v1.0. **Seed Studio Works**, 2010. Disponível em: <<http://www.seeedstudio.com/depot/datasheet/RFBee1.0%20User%20Manual.pdf>>. Acesso em: 11 janeiro 2012.

SEIDLER, K. O. XAMPP. **APACHE FRIENDS**, 2011. Disponível em: <<http://www.apachefriends.org/en/xampp.html>>. Acesso em: 11 janeiro 2012.

SENDI, P. D. X. XX SENDI - SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2012.

SICSÚ, J.; CASTELA, A. **Sociedade e Economia**: Estratégias de Crescimento e Desenvolvimento – Governo Federal. [S.l.]: IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2010.

SILVA, D. R. EduBOT. **EduBOT**, 2011. Disponível em: <<http://uriedubot.wordpress.com/>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

SILVA, H. A. B.; MOTA, A. A.; M., M. L. T. Dimensionamento de anel anti-corona em isolador polimérico para classe de tensão de 500 kV através do estudo de campo elétrico. **Anais do VI Workshop de pós-graduação e pesquisa do Centro Paula Souza - 2011**, São Paulo - SP, outubro 2011.

SILVA, S. **Notas de aula. “Introdução ao Método dos Elementos Finitos”**. Foz do Iguaçu - PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2009.

SILVERSPRING NETWORKS. A Rede Inteligente de Eficiência Energética do Futuro. **SilverSpring Networks**, 2012. Disponível em: <<http://www.silverspringnet.com/pt/aboutus/>>. Acesso em: 16 setembro 2012.

SMART GRID – DIRECT COMMUNICATION FOR ENERGY NETWORKS. Wind Mill Monitoring using GPRS. **Smart Grid – DIRECT Communication for Energy Networks**, 2010. Disponível em: <<http://smartgriddirect.com/wind-mill-monitoring/>>. Acesso em: 17 abril 2010.

SMARTGRID NEWS. Conheça o primeiro trabalho sobre Smart Grid desenvolvido por pesquisadores no Brasil. **Smart Grid News**, 2011. Disponível em: <<http://smartgridnews.com.br/conheca-com-exclusividade-o-primeiro-trabalho-sobre-smart-grid-desenvolvido-por-pesquisadores-brasileiros/>>. Acesso em: 19 outubro 2012.

SMARTGRID NEWS. Entrevista: VP da Elster fala sobre novo padrão de medição inteligente no Brasil. **Smart Grid News**, 2012. Disponível em: <<http://smartgridnews.com.br/entrevista-vp-da-elster-fala-sobre-novo-padrao-de-medicao-inteligente-no-brasil/>>. Acesso em: 16 setembro 2012.

SOFTONIC INTERNATIONAL. Python. **SOFTONIC INTERNATIONAL**, 2012. Disponível em: <<http://python.softonic.com.br/>>. Acesso em: 16 janeiro 2012.

SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Belem - PA: Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, , 2003.

STOLPER, R.; HART, J.; MAHATHO, N. The design and evaluation of a multispectral imaging camera for the inspection of transmission lines and substation equipment. **SPECIAL CAMERA**, 2006. Disponível em: <http://www.specialcamera.com/MC/MCAM_Dev.pdf>. Acesso em: 15 setembro 2012.

TANNE, K.; BURSTONE, C.; SAKUDA, M. Biomechanical responses of tooth associated with different root lengths and alveolarbone heights: changes of stress distributions in the PDL. **J Osaka Univ Dent Sch**, Osaka, dezembro 1989. 17-24.

TANNE, K.; SAKUDA, M. A dynamic analysis of stress in thetooth and its support structures: the use of the finite elementmethod as numerical analysis (abstr.). **J Japanese OrthodSch**, Tokyo, 1979. 374-382.

TANNE, L.; MATSUBARA, S.; SAKUDA, M. Stress distributions inthe maxillary complex from orthopedic headgear forces. **AngleOrthod**, Appleton, 1993. 111-118.

TAVARES, C. E. Ciência e Tecnologia dos Materiais. **Scribd**, 2009. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/86844271/95/Permeabilidade-Relativa>>. Acesso em: 19 Junho 2012.

TAVARES, G. et al. Otimização de Linha de Transmissão não Convencional de Alta Capacidade em 500 kV. **XIII ERIAC**, 2009. Disponível em: <<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/XIII%20Eriac/B2/B2-23.pdf>>. Acesso em: 19 Janeiro 2011.

TELECO. Tecnologia PLC II: Estudo Mercadológico. **TELECO**, 2012. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialplcalt2/pagina_2.asp>. Acesso em: 11 junho 2012.

THOMAZINI, D. **Classificação da Hidrofobicidade em Isoladores Elétricos Poliméricos de Alta Tensão**. São Carlos: Tese de Doutorado na Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Elétrica, 2009.

TOFFONI, L. Fibra óptica. **InfoEscola**, 2009. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/fibra-optica/>>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

UFRGS. Capítulo 3 - A LEI DE GAUSS. **Eletricidade e Magnetismo**, 2003. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod03/m_s02.html>. Acesso em: 11 agosto 2012.

UNESP. Poder das Pontas. **ELETROMAGNETISMO DEMONSTRAÇÕES**, 2012. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas%20htmls/Poder%20das%20Pontas.htm>. Acesso em: 25 agosto 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE. PRIMEIRA LEI DE OHM. **Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe**, 2012. Disponível em: <http://www.fisica.ufs.br/Fisica/apostilas/fisicab/ApostilaLABFIS_B_Cap3_1LeideOhm.pdf>. Acesso em: 26 Junho 2012.

VASCONCELOS, J. A. Departamento de Engenharia Elétrica. **Eletromagnetismo**, 2010. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~joao/Eletromagnetismo/Eletromag02.pdf>>. Acesso em: 05 agosto 2012.

VICENTE, C. B. Smart Grid – O projeto Eletropaulo. **ABINEE**, 2007. Disponível em: <<http://www.tec.abinee.org.br/2007/arquivos/s1702.pdf>>. Acesso em: 17 março 2010.

WIKIMEDIA. File:Electromagnetism.png. **WIKIMEDIA COMMONS**, 2009. Disponível em: <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetism.png>>. Acesso em: 15 agosto 2012.

YANAGUIZAWA, J. A.; SHINOHARA, A. H. Isolamento mínimo em cadeias de isoladores de vidro danificados por vandalismo em linhas de transmissão. **Cientec - Revista de Ciência, Tecnologia e Humanidades do IFPE**, Recife, 3, Julho 2011. 132-142.

9. ANEXOS

9.1. Anexo A – Modulação BPSK

A modulação BPSK (*“Binary Phase Shift Keying”*) é um dos sub-tipos da modulação PSK (*“Phase Shift Keying”*), que é muito utilizado em rádio digital.

A modulação BPSK possui este nome em função de possui dois (*Binary*) estados da portadora. Pode-se, por exemplo, utilizar o ângulo 0 para representar o bit 1, enquanto que para representar o bit 0 existirá uma alternância deste ângulo em 180°, conforme pode ser visualizado na Figura 164 (LASKOSKI, MARCONDES e SZEREMETA, 2006).

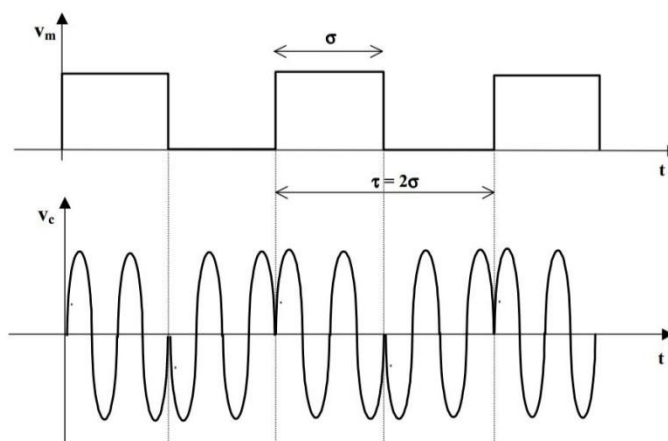


Figura 164. Exemplo de sinal modulado BPSK (ISEL, 2010)

Na Figura 164 é possível observar o sinal a ser transmitido representado por “ v_m ” e o sinal modulado representado por “ v_c ”, nota-se que quando o sinal a ser transmitido é “1” a senoide correspondente ao sinal a ser transmitido possui ângulo de 0°, enquanto que para a transmissão de “0” este ângulo é de 180°.

9.2. Anexo B – Modulação O-QPSK

A modulação O-QPSK (*“Offset Quaternary PSK”*) tenta solucionar um problema presente na modulação QPSK que é de mudanças descontínuas de fase, como por exemplo, mudança do símbolo “11” para “00”. Com isto a modulação O-QPSK limita as transições de fase do sinal modulado a no máximo 90° , possibilitando a utilização de utilizar amplificadores não lineares.

Na modulação O-QPSK o canal Q é deslocado por meio tempo de símbolo (representado na Figura 165 por Q_d), com isto os canais I e Q não sofrem transições ao mesmo tempo. Esta diferença é muito visível no gráfico de constelação que compara as modulações QPSK e O-QPSK, conforme Figura 166.

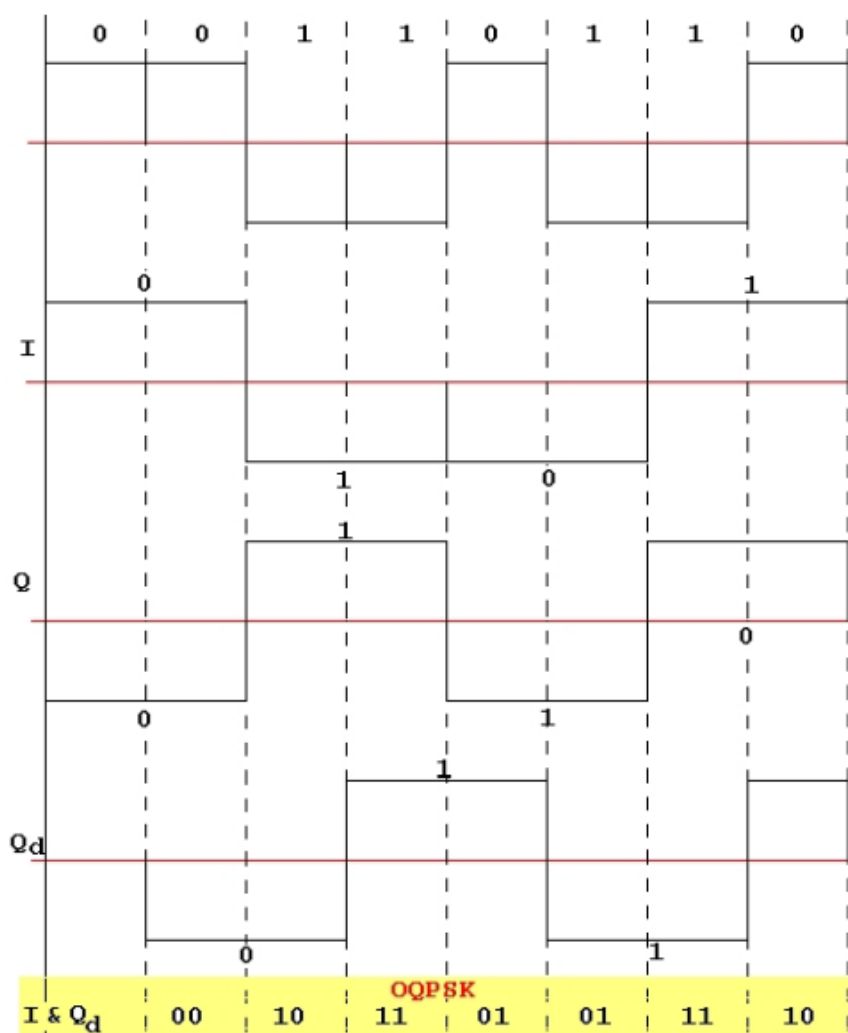


Figura 165. Modulação O-QPSK (MACHADO, 2010)

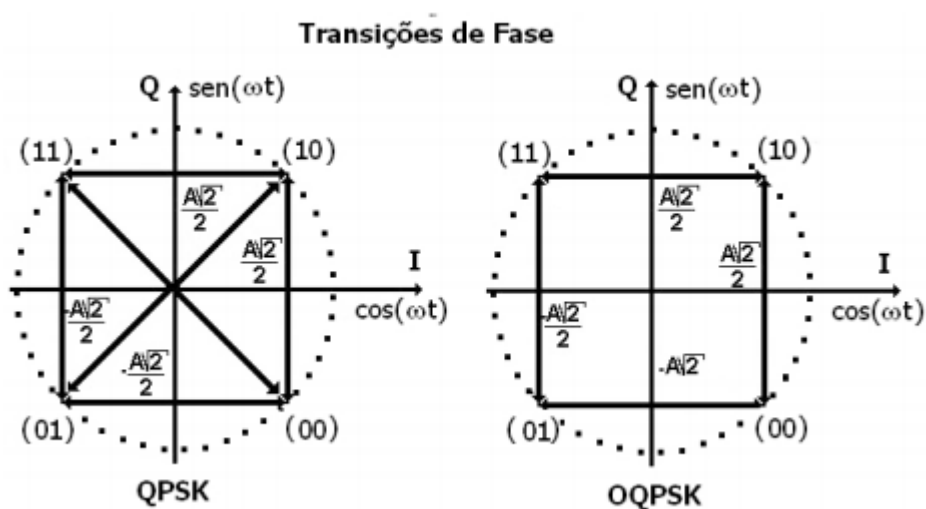


Figura 166. Constelação QPSK e O-QPSK (MACHADO, 2010)

Esta distorção também pode ser visualizada no diagrama de olho que é apresentado na Figura 167.

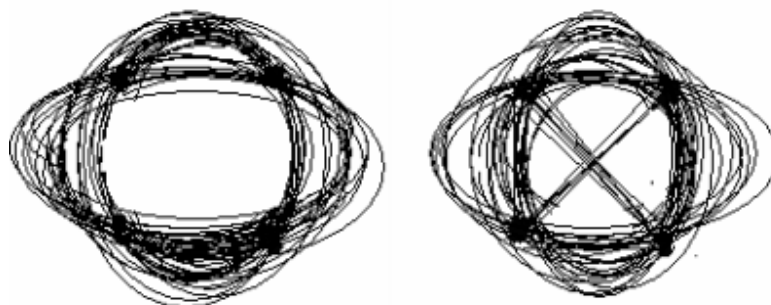


Figura 167. Diagrama de constelação da modulação O-QPSK e QPSK
(BAPTISTA, 2008)

Na Figura 167 é possível observar que mesma a modulação O-QPSK utilizando quatro fases distintas na transmissão não existe a passagem do sinal na origem (0,0 – centro da constelação).

9.3. Anexo C – Topologias para redes ZigBee

Topologia em malha (*mesh*)

Na topologia em malha, o dispositivo central é o coordenador (FFD) e está ligado com os roteadores (FFD) e estes ligados com os dispositivos finais (RFD's). Nesta topologia os dispositivos estão interligados podendo gerar uma grande malha, dando maior flexibilidade e alcance para a rede. Esta rede aumenta sua confiabilidade, pois a informação pode seguir por diversos caminhos.

A topologia em malha não existe uma centralização no dispositivo coordenador, pois os roteadores podem enviar informações para qualquer dispositivo da rede, sendo assim, o dispositivo coordenador possui a principal função de registrar a entrada e saída de dispositivos da rede.

A Figura 168 apresenta este tipo de rede.

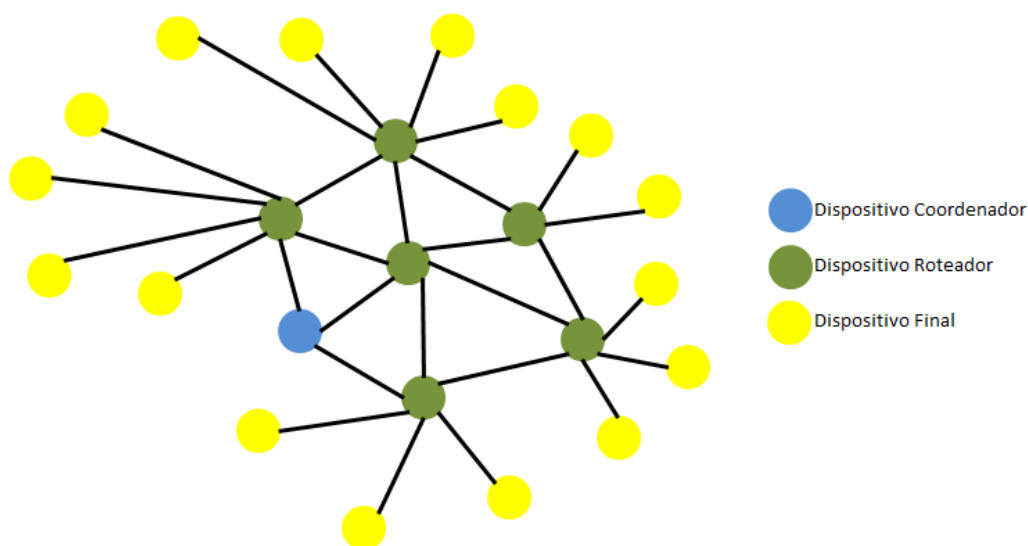


Figura 168. Topologia de rede malha

Na Figura 168 podemos observar que existe o dispositivo coordenador que está interligado com os dispositivos roteadores e estes por sua vez estão ligados aos dispositivos finais. A expansão deste tipo de rede é de fácil aplicação, por isto é muito utilizado em redes de sensores sem fio (RSSF).

Topologia em estrela (*star*)

A topologia em estrela é o tipo mais simples de rede, ela é composta por um dispositivo coordenador e possui interligado com até 65.535 dispositivos finais. Nesta rede o coordenador realiza toda a comunicação dos dispositivos, por isto esta rede apesar de ser simples não é aconselhável de ser implementada em locais que possuam obstáculos que dificultam a transmissão e recepção das informações.

A Figura 169 apresenta este tipo de rede.

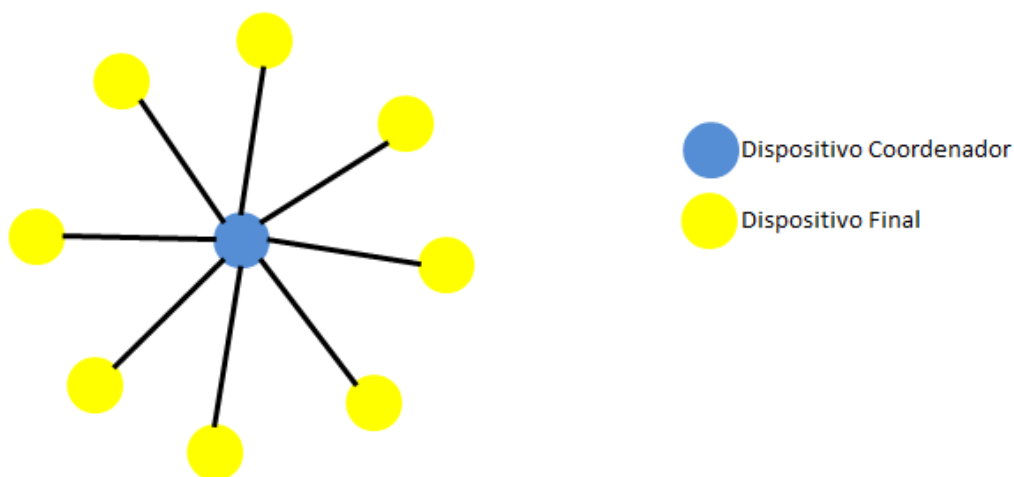


Figura 169. Topologia de rede estrela

Na Figura 169 podemos visualizar que o dispositivo coordenador é o dispositivo central desta rede e toda troca de informações é gerenciada por este dispositivo, ou nó central como é conhecido.

Topologia em árvore (*cluster tree*)

A topologia em árvore é muito parecida com a topologia em malha, possui um dispositivo coordenador, no qual estão interligados com os dispositivos

roteadores, entretanto nesta topologia existe uma ordem hierárquica de ligações, o dispositivo coordenador está interligado com os dispositivos roteadores que sua vez estão interligados aos dispositivos finais. A Figura 170 ilustra esta topologia.

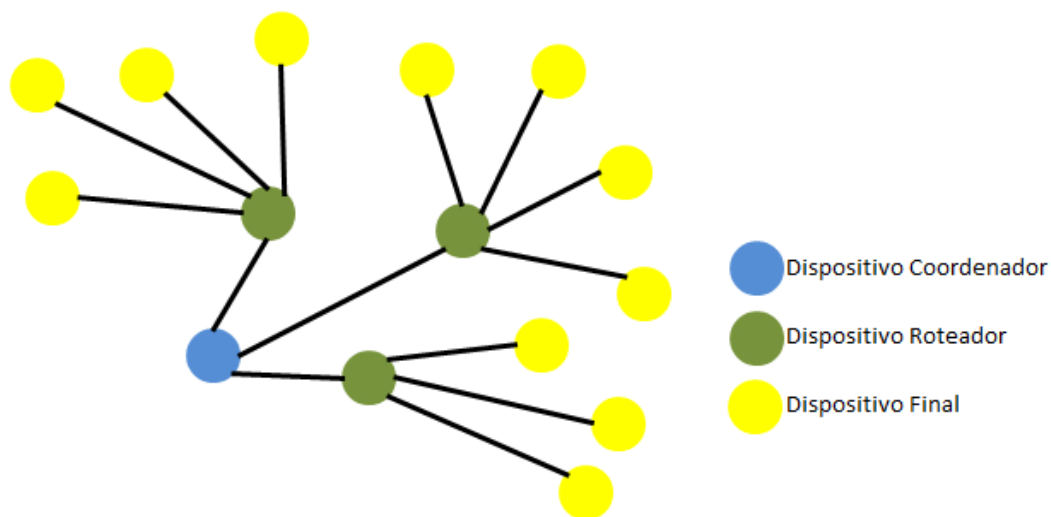


Figura 170. Topologia de rede árvore

Na Figura 170 é possível verificar a hierarquia deste tipo de rede, na qual o dispositivo coordenador, também conhecido como nó mestre, realiza a distribuição da informação entre os dispositivos da rede. Deste modo o dispositivo coordenador repassa a informação para os dispositivos roteadores e esse por sua vez passa para os dispositivos finais, entretanto a responsabilidade de encaminhar estas informações é do dispositivo coordenador. Gestor de Autenticação e Largura de Banda

9.4. Anexo D – Camadas do protocolo ZigBee

As camadas do protocolo ZigBee pode ser visualizada na Figura 171.

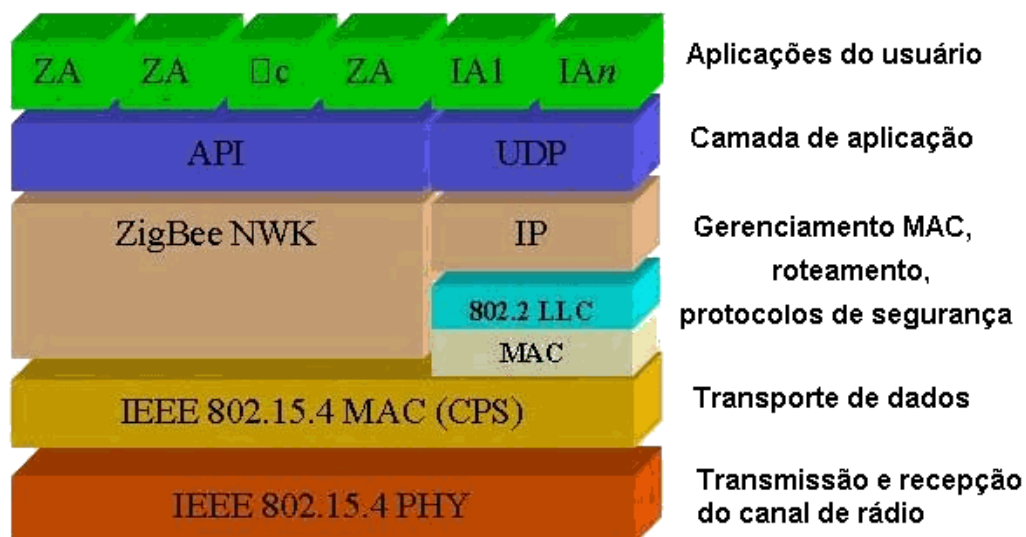


Figura 171. Camadas do protocolo ZigBee (PINHEIRO, 2010)

Camada PHY (“*physical layer*”) é a camada física do dispositivo (camada mais baixa) no qual utiliza a técnica de transmissão de sequencia direta (DSS). É responsável por codificar e decodificar os bits, selecionamento do canal para envio dos dados e prestar informações, como por exemplo, potencia e qualidade do sinal para a camada superior (MAC).

Camada MAC (“*Medium Access Control*”) desenvolvida para prover multiplas topologias apresentando grande simplicidade para o mesmo, o gerenciamento de energia apresenta uma operação simples. Esta camada foi projetada com o intuito de facilitar o crescimento da rede, sem a necessidade de equipamentos mais robustos.

Camada de rede NWK (“*Network*”) possui a finalidade de implementar a pilha de protocolos, balanceando assim o custo para aplicações específicas é responsável também pelo roteamento das mensagens transmitidas e sua segurança. É esta camada que possibilita o crescimento da rede sem a necessidade de utilizar equipamentos dotados de potencia elevada (MUÑOZ, 2009).

Camada de suporte à aplicação (APS) possui a finalidade de realizar as ligações e descobertas dos dispositivos vizinhos. Também realiza o roteamento dos diversos dispositivos de uma rede, possuindo uma tabela contendo as conexões compatíveis com outros pontos (MUÑOZ, 2009). Pretendendo assim assegurar gestão e suporte para as diversas aplicações. Esta camada é uma interface entre a camada NWK e a camada de aplicação.

Camada de aplicação possui a função de estabelecer segurança, além de possuir o código de cada aplicação da rede definindo como atuará cada nó da rede.

9.5. Anexo E – Ficha Técnica do Isolador IPB 500/CB/120/EAP/117



BALESTRO



QUADRO DE DADOS TÉCNICOS E CARACTERÍSTICAS GARANTIDAS



TECHNICAL DATA SHEET AND GUARANTEED VALUES



PLANILLA DE DATOS GARANTIZADOS

Isoladores compostos poliméricos para linhas aéreas

Transmission class polymeric insulators

Aisladores compuestos poliméricos para líneas aéreas

Nome do Fabricante / *Manufacturer* / Fabricante:

Ind. Eletromecânica BALESTRO Ltda.

País de origem / *Provenance country* / Procedencia:

BRASIL

Item	Descrição / <i>Characteristic</i> / Descripción	Características/Unidade <i>Guaranteed Value / Unit</i> Característica / Unidad
1	Tipo ou Modelo do isolador <i>Type or model</i> Tipo o Modelo Normas de fabricação e ensaios <i>Manufacture and tests standards</i> Normas de fabricación y ensayos Nível de Poluição (IEC 60815) <i>Pollution severity levels</i> Nível de polución	IPB 500/CB/120/EAP/117 IEC 61109 / NBR 15122 e
2	Materiais utilizados <i>Materials</i> Materiales	
2.1	Núcleo <i>Core</i> Núcleo	Tarugo pultrudado de fibras de vidro <i>Pultruded Fiberglass</i> Barra peltrudada de fibras de vidro
2.2	Revestimento <i>Housing</i> Cobertura	Borracha de silicone <i>Silicone Rubber</i> Caucho de silicona
2.3	Ferragens integrantes <i>Metal Endings</i> Herrajes	Aço carbono forjado zincado a quente <i>Forged steel hot dip galvanized</i> Acero forjado galvanizado en caliente

Item	Descrição / <i>Characteristic</i> / Descripción	Características/Unidade <i>Guaranteed Value / Unit</i> Característica / Unidad
3	Características elétricas <i>Electrical characteristics</i> Características eléctricas 3.1 Tensão nominal de operação <i>Rated Voltage</i> Clase de tensión 3.2 Tensão suportável nominal em freqüência industrial, a seco e sob chuva, 60 s <i>Power frequency withstand voltage</i> Tensión soportable a frecuencia industrial, a seco y bajo lluvia, 60 s 3.3 Tensão de contorno em freqüência industrial, sob chuva <i>Power frequency flashover voltage, wet</i> Tensión de contorno em frecuencia industrial, bajo lluvia 3.4 Tensão suportável nominal de impulso de manobra sob chuva <i>Wet Switching Impulse withstand voltage</i> Tensión soportable nominal de impulso de manobra a bajo de lluvia 3.5 Tensão suportável nominal de impulso atmosférico, a seco, ambas polaridades <i>Impulse withstand voltage, dry, both polarities</i> Tensión soportable nominal de impulso atmosférico a seco, ambas polaridades 3.6 Tensão crítica de contorno a impulso <i>Critical impulse flashover voltage</i> Tensión de contorno a impulso - polaridade positiva <i>positive polarity</i> polaridade positiva - polaridade negativa <i>negative polarity</i> polaridade negativa 3.7 Nível máximo de tensão de radiointerferência <i>Radio interference voltage</i> Nível máximo de tensão de radiointerferencia	 500 kV ef 870 kV ef 940 kV ef 1.230 kV crista 1.850 kV crista 1.900 kV crista 1.920 kV crista 300 microvolts
4	Características mecânicas: <i>Mechanical characteristics:</i> Características Mecânicas 4.1 Distância de escoamento <i>Creepage distance</i> Línea de fuga 4.2 Distância de arco <i>Dry arc distance</i> Distancia arco seco 4.3 Carga mecânica nominal (CMN) <i>Specified Mechanical Load (SML)</i> Carga Mecânica Nominal (CMN) 4.4 Carga mecânica de rotina (CMR) <i>Routine test load (RTL)</i> Carga mecânica de rotina (CMR) 4.5 Comprimento "L" (centro a centro) <i>Length "L"</i> Extensión "L" 4.6 Número de saias <i>Number of sheeds</i> Numero aletas 4.7 Cor <i>Color</i> Color 4.8 Peso (kg) <i>Weight</i> Peso	 13.700 mm 3.065 mm 120 kN 60 kN 3.551 mm 117 Cinza / <i>Gray</i> / Gris 16,0

9.6. Anexo F – Programação realizada em PHP para desenho da geometria do isolador

Arquivo chamado new.php

```
<script>

function registra(){
texto = prompt("Qual o número de saias do isolador?");
document.form1.action="./new5.php?texto="+texto;
document.form1.submit();
}
</script>
<form method="POST" name="form1">
<input type="button" value="Digite o número de saias do isolador"
        onclick="registra()">
</form>
<?
echo $texto;
?>
```

Arquivo chamado new5.php

<pre><title>Programa dimensionamento para Gmsh</title> <?php \$saia = \$_GET['texto']; # echo "//A quantidade de saias deste # isolador é \$saia
"; # \$n=0; # for (\$n=0;\$n<=\$saia/2;\$n++) # { # echo \$n. "
"; # } #funções utilizadas para escrever o ponto, a # linha e o círculo function ponto(\$pi, \$a, \$b) { print "Point(\$pi) = { \$a , \$b , 0.0 , 0.08 };
"; } function linha(\$li, \$a, \$b) { print "Line(\$li) = { \$a , \$b};
"; } function curva(\$li, \$a, \$b, \$c) { print "Circle(\$li) = { \$a , \$b , \$c };
"; } ##### #declaração de variáveis \$n = 0; #número do conjunto das aletas, # será útil para desenhar várias # aletas</pre>	<pre>\$pi = 0; #numero do ponto inicial dos # pontos a serem desenhados \$li = 0; #número da linha/circulo # inicial que interligaram os pontos # no desenho \$ce = \$pi; #variável para desenho do # círculo externo ##### #DESENHANDO O TERMINAL BOLA echo '// Desenho do terminal bola
'; echo '//Material utilizado na fabricação do # terminal bola: SAE 1020 Forjado # Galvanizado a quente
 '; #definição da posição dos pontos \$x1= 0.00; \$y1= 0.0; \$x2= 0.0; \$y2= 0.0500918; \$x3= 0.0142424; \$y3= 0.0020708; \$x4= 0.0134420; \$y4= 0.0047645; \$x5= 0.0153129; \$y5= 0.0068611; \$x6=-0.0000003; \$y6=-0.0103000; \$x7= 0.0099091; \$y7= 0.0104558; \$x8= 0.0112016; \$y8= 0.0131631; \$x9= 0.0082016; \$y9= 0.0131631; \$x10= 0.0082016; \$y10= 0.0315773; \$x11= 0.0182016; \$y11= 0.0315773; \$x12= 0.0112016; \$y12= 0.0387188;</pre>
--	---

```

$x13= 0.0000016;
$y13= 0.0501450;
$x14= 0.0160016;
$y14= 0.0501450;
$x15= 0.0160016;
$y15= 0.0577000; #início do anel anti-corona
$x16= 0.0160016; #término do anel anti-
corona
$y16= 0.1117000;
$x17= 0.0160016;
$y17= 0.1325812;
$x18= 0.0160016;
$y18= 0.1384919;
$x19= 0.0175016;
$y19= 0.1384919;
$x20= 0.0169391;
$y20= 0.1398824;
$x21= 0.0160016;
$y21= 0.1422000;
$x22= 0.0185016;
$y22= 0.1422000;
$x23= 0.0160016;
$y23= 0.1422000;
$x24= 0.0160016;
$y24= 0.1447000;
$x25= 0.0;
$y25= 0.0596991;
$x26= 0.0087532;
$y26= 0.0596991;
$x27= 0.0087532;
$y27= 0.1421991;
$x28= 0.0112532;
$y28= 0.1421991;
$x29= 0.0112532;
$y29= 0.1446991;

#desenhando os pontos, curvas e linhas
ponto ($pi, $x1, $y1);
$pi++;

$spinterl1 = $pi;

ponto ($pi, $x2, $y2);
$pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x3, $y3);
$pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x4, $y4);
$pi++;

ponto ($pi, $x5, $y5);
$pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x6, $y6);
$pi++;

ponto ($pi, $x7, $y7);
$pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x8, $y8);
$pi++;

ponto ($pi, $x9, $y9);
$pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x10, $y10);
$pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x11, $y11);
$pi++;

ponto ($pi, $x12, $y12);
$pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x13, $y13);
$pi++;

ponto ($pi, $x14, $y14);
$pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
$li++;

$spia1 = $pi; # ponto de início do anel anti-
corona 1

ponto ($pi, $x15, $y15);
$pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
$li++;

$spia2 = $pi; # ponto de início do anel anti-
corona 2

ponto ($pi, $x16, $y16);
$pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
$li++;

$spis = $pi; # ponto de início do silicone

ponto ($pi, $x17, $y17);
$pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x18, $y18);
$pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x19, $y19);
$pi++;

ponto ($pi, $x20, $y20);
$pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
$li++;

ponto ($pi, $x21, $y21);
$pi++;

```

```

ponto ($pi, $x22, $y22);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x23, $y23);
    $pi++;

$pf = $pi;

ponto ($pi, $x24, $y24);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

$sti1 = $pi; #definição do inicio do tarugo

ponto ($pi, $x25, $y25);
    $pi++;

ponto ($pi, $x26, $y26);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

$sti2 = $pi; #definição do inicio do tarugo

ponto ($pi, $x27, $y27);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x28, $y28);
    $pi++;

ponto ($pi, $x29, $y29);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

linha ($li, $pi-1, $pf);
    $li++;

linha ($li, $pf+1, $pinterl1);
    $li++;

#fim do desenho do terminal bola (terminal
fase)
#####
#desenho da parte inferior das aletas
$x30 = 0.0170032;
$y30 = 0.1332490 + $n*0.055000;
$x31 = 0.0190032;
$y31 = 0.1332490 + $n*0.055000;
$x32 = 0.0190032;
$y32 = 0.1347490 + $n*0.055000;
$x33 = 0.0205032;
$y33 = 0.1347490 + $n*0.055000;
$x34 = 0.0205032;
$y34 = 0.1467490 + $n*0.055000;
$x35 = 0.0190032;
$y35 = 0.1467490 + $n*0.055000;
$x36 = 0.0190032;
$y36 = 0.1482490 + $n*0.055000;
$x37 = 0.0135032;
$y37 = 0.1482490 + $n*0.055000;
$x38 = 0.0135032;
$y38 = 0.1482490 + $n*0.055000;
$x39 = 0.0135032;
$y39 = 0.1748383 + $n*0.055000;

$x40 = 0.0145066;
$y40 = 0.1781600 + $n*0.055000;

#desenhando os pontos, curvas e linhas
ponto ($pi, $x30, $y30);
    $pi++;

linha ($li, $pi-1, $pis);
    $li++;

ponto ($pi, $x31, $y31);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x32, $y32);
    $pi++;

ponto ($pi, $x33, $y33);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x34, $y34);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x35, $y35);
    $pi++;

ponto ($pi, $x36, $y36);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x37, $y37);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1); #linha ($li,
    $pi-3, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x38, $y38);
    $pi++;

ponto ($pi, $x39, $y39);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x40, $y40);
    $pi++;

#####
#realizando o loop para desenhar a sequencia
das aletas

for ($n = 0; $n < (($saia/2)-1; $n++) {
#posição das aletas
$x41 = 0.0195032;
$y41 = 0.1748383 + $n*0.055000;
$x42 = 0.0188438;
$y42 = 0.1808020 + $n*0.055000;
$x43 = 0.0672612;
$y43 = 0.1781600 + $n*0.055000;
$x44 = 0.0689915;
$y44 = 0.1795097 + $n*0.055000;
$x45 = 0.0674515;
$y45 = 0.1797000 + $n*0.055000;
$x46 = 0.0676418;

```

```

$y46 = 0.1812400 + $n*0.055000;
$x47 = 0.0184142;
$y47 = 0.1870499 + $n*0.055000;
$x48 = 0.0135032;
$y48 = 0.1929503 + $n*0.055000;
$x49 = 0.0195032;
$y49 = 0.1929593 + $n*0.055000;
$x50 = 0.0135032;
$y50 = 0.2023383 + $n*0.055000;
$x51 = 0.0145066;
$y51 = 0.2056600 + $n*0.055000;
$x52 = 0.0195032;
$y52 = 0.2023383 + $n*0.055000;
$x53 = 0.0200262;
$y53 = 0.2083155 + $n*0.055000;
$x54 = 0.0532612;
$y54 = 0.2056600 + $n*0.055000;
$x55 = 0.0549915;
$y55 = 0.2070097 + $n*0.055000;
$x56 = 0.0534515;
$y56 = 0.2072000 + $n*0.055000;
$x57 = 0.0536418;
$y57 = 0.2087400 + $n*0.055000;
$x58 = 0.0184142;
$y58 = 0.2129054 + $n*0.055000;
$x59 = 0.0135032;
$y59 = 0.2188057 + $n*0.055000;
$x60 = 0.0195032;
$y60 = 0.2188057 + $n*0.055000;
$x61 = 0.0135032;
$y61 = 0.2298383 + $n*0.055000;

#desenhando os pontos, linhas e círculos da
  parte entre o terminal bola e a
  primeira aleta

ponto ($pi, $x41, $y41);
  $pi++;

if ($n<1){
  curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
    $li++;
  }

ponto ($pi, $x42, $y42);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x43, $y43);
  $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x44, $y44);
  $pi++;

ponto ($pi, $x45, $y45);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x46, $y46);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x47, $y47);
  $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x48, $y48);
  $pi++;

ponto ($pi, $x49, $y49);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x50, $y50);
  $pi++;

linha ($li, $pi-3, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x51, $y51);
  $pi++;

ponto ($pi, $x52, $y52);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x53, $y53);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x54, $y54);
  $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x55, $y55);
  $pi++;

ponto ($pi, $x56, $y56);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x57, $y57);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x58, $y58);
  $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x59, $y59);
  $pi++;

ponto ($pi, $x60, $y60);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x61, $y61);
  $pi++;

linha ($li, $pi-3, $pi-1);
  $li++;

```

```

# fim do loop do denhado das aletas - o
  valor da quantidade destas aletas é
  o total menos 1
#####
}
#desenhando a última aleta
$nl = $n;

#declaração das posições dos pontos

$x62 = 0.0145066;
$y62 = (3.3131591-3.1349991)+$nl*0.055;
$x63 = 0.0195932;
$y63 = (3.3098375-3.1349991)+$nl*0.055;
$x64 = 0.0188438;
$y64 = (3.3158011-3.1349991)+$nl*0.055;
$x65 = 0.0672612;
$y65 = (3.3131591-3.1349991)+$nl*0.055;
$x66 = 0.0689915;
$y66 = (3.3145088-3.1349991)+$nl*0.055;
$x67 = 0.0672612;
$y67 = (3.3146991-3.1349991)+$nl*0.055;
$x68 = 0.0676418;
$y68 = (3.3162391-3.1349991)+$nl*0.055;
$x69 = 0.0184142;
$y69 = (3.3220491-3.1349991)+$nl*0.055;
$x70 = 0.0135032;
$y70 = (3.3279494-3.1349991)+$nl*0.055;
$x71 = 0.0195032;
$y71 = (3.3279494-3.1349991)+$nl*0.055;
$x72 = 0.0135032;
$y72 = (3.3562421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x73 = 0.0150032;
$y73 = (3.3577421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x74 = 0.0150032;
$y74 = (3.3562421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x75 = 0.0190032;
$y75 = (3.3577421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x76 = 0.0205032;
$y76 = (3.3592421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x77 = 0.0190032;
$y77 = (3.3592421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x78 = 0.0205032;
$y78 = (3.3712421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x79 = 0.0190032;
$y79 = (3.3727421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x80 = 0.0190032;
$y80 = (3.3712421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x81 = 0.0170032;
$y81 = (3.3727421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x82 = 0.0160032;
$y82 = (3.3737421-3.1349991)+$nl*0.055;
$x83 = 0.0145066;
$y83 = 0.1781600+$nl*0.055000;

#desenhando os pontos, linhas e círculos da
  última aleta e da parte até o
  terminal concha

ponto ($pi, $x62, $y62);
  $pi++;

ponto ($pi, $x63, $y63);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x64, $y64);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x65, $y65);
  $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x66, $y66);
  $pi++;

ponto ($pi, $x67, $y67);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x68, $y68);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x69, $y69);
  $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x70, $y70);
  $pi++;

ponto ($pi, $x71, $y71);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x72, $y72);
  $pi++;

linha ($li, $pi-3, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x73, $y73);
  $pi++;

ponto ($pi, $x74, $y74);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x75, $y75);
  $pi++;

linha ($li, $pi-3, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x76, $y76);
  $pi++;

ponto ($pi, $x77, $y77);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
  $li++;

ponto ($pi, $x78, $y78);
  $pi++;

linha ($li, $pi-3, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x79, $y79);
  $pi++;

ponto ($pi, $x80, $y80);

```

```

    $pi++;
curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
    $li++;
ponto ($pi, $x81, $y81);
    $pi++;
linha ($li, $pi-3, $pi-1);
    $li++;

$pfis = $pi; # posição do ultimo ponto do
            silicone
ponto ($pi, $x82, $y82);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

# fim do desenho da última aleta
#####
#DESENHO DO TERMINAL CONCHA

#Definição das coordenadas dos pontos
$x84 = 0.0155032;
$y84 = (3.3737421-3.134997)+$n1*0.055;
$x85 = 0.0160032;
$y85 = (3.4477421-3.134997)+$n1*0.055;
$x86 = 0.0106699;
$y86 = (3.4596678-3.134997)+$n1*0.055;
$x87 = 0.0000032;
$y87 = (3.4477421-3.134997)+$n1*0.055;
$x88 = 0.0090032;
$y88 = (3.4633946-3.134997)+$n1*0.055;
$x89 = 0.0140032;
$y89 = (3.4633946-3.134997)+$n1*0.055;
$x90 = 0.0090032;
$y90 = (3.4657421-3.134997)+$n1*0.055;
$x91 = 0.0190032;
$y91 = (3.4757421-3.134997)+$n1*0.055;
$x92 = 0.0190032;
$y92 = (3.4657421-3.134997)+$n1*0.055;
$x93 = 0.0250032;
$y93 = (3.4817421-3.134997)+$n1*0.055;
$x94 = 0.0190032;
$y94 = (3.4817421-3.134997)+$n1*0.055;
$x95 = 0.0250032;
$y95 = (3.5057421-3.134997)+$n1*0.055;
$x96 = 0.0150032;
$y96 = (3.5157421-3.134997)+$n1*0.055;
$x97 = 0.0150032;
$y97 = (3.5057421-3.134997)+$n1*0.055;
$x98 = 0.0;
$y98 = (3.5157421-3.134997)+$n1*0.055;
$x99 = 0.0;
$y99 = (3.4446901-3.134997)+$n1*0.055;
$x100 = 0.0087532;
$y100 = (3.4446901-3.134997)+$n1*0.055;
$x101 = 0.0087532;
$y101 = (3.3661901-3.134997)+$n1*0.055;
$x102 = 0.0112532;
$y102 = (3.3661901-3.134997)+$n1*0.055;
$x103 = 0.0112532;
$y103 = (3.3636901-3.134997)+$n1*0.055;
$x104 = 0.0160032;
$y104 = (3.3636901-3.134997)+$n1*0.055;
$x105 = 0.0160032;
$y105 = (3.3661901-3.134997)+$n1*0.055;
$x106 = 0.0185032;
$y106 = (3.3661901-3.134997)+$n1*0.055;
$x107 = 0.0169407;
$y107 = (3.3685077-3.134997)+$n1*0.055;
$x108 = 0.0175032;
$y108 = (3.3698982-3.134997)+$n1*0.055;

$x109 = 0.0160032;
$y109 = (3.3698982-3.134997)+$n1*0.055;

#definição dos pontos, curvas e linhas
ponto ($pi, $x85, $y85);
    $pi++;

linha ($li, $pi-1, $pi-2);
    $li++;

ponto ($pi, $x86, $y86);
    $pi++;

ponto ($pi, $x87, $y87);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
    $li++;

ponto ($pi, $x88, $y88);
    $pi++;

ponto ($pi, $x89, $y89);
    $pi++;

curva ($li, $pi-4, $pi-1, $pi-2);
    $li++;

ponto ($pi, $x90, $y90);
    $pi++;

linha ($li, $pi-3, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x91, $y91);
    $pi++;

ponto ($pi, $x92, $y92);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
    $li++;

ponto ($pi, $x93, $y93);
    $pi++;

ponto ($pi, $x94, $y94);
    $pi++;

curva ($li, $pi-4, $pi-1, $pi-2);
    $li++;

ponto ($pi, $x95, $y95);
    $pi++;

linha ($li, $pi-3, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x96, $y96);
    $pi++;

ponto ($pi, $x97, $y97);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-1, $pi-2);
    $li++;

ponto ($pi, $x98, $y98);
    $pi++;

linha ($li, $pi-3, $pi-1);
    $li++;

$tf1=$pi; #ponto de referencia para desenho
do tarugo

```

```

ponto ($pi, $x99, $y99);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x100, $y100);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

$tf2=$pi; #ponto de referencia para desenho
do tarugo

ponto ($pi, $x101, $y101);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x102, $y102);
    $pi++;

ponto ($pi, $x103, $y103);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x104, $y104);
    $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x105, $y105);
    $pi++;

ponto ($pi, $x106, $y106);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x107, $y107);
    $pi++;

curva ($li, $pi-2, $pi-3, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x108, $y108);
    $pi++;

ponto ($pi, $x109, $y109);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

linha ($li, $pi-1, $pfs);
    $li++;
echo '//Término do desenho concha<br /> ';
#TÉRMINO DO DESENHO CONCHA
#####
#DESENHO DO TARUGO
linha ($li, $tf1, $t1);
    $li++;
linha ($li, $tf2, $t2);
    $li++;

echo '//Término do desenho do tarugo<br />
';
#TÉRMINO DO DESENHO DO TARUGO
#####
#DESENHO DO ANEL ANTI-CORONA
#Declaração das posições dos pontos
$x110 = 0.039991;
$y110 = 0.057700;
$x111 = 0.039991;
$y111 = 0.060700;
$x112 = 0.042991;
$y112 = 0.060700;
$x113 = 0.042991;
$y113 = 0.108700;
$x114 = 0.039991;
$y114 = 0.108700;
$x115 = 0.039991;
$y115 = 0.111700;
#$pia1 e $pia2

#definição dos pontos, curvas e linhas
ponto ($pi, $x110, $y110);
    $pi++;

linha ($li, $pi-1, $pia1);
    $li++;

ponto ($pi, $x111, $y111);
    $pi++;

ponto ($pi, $x112, $y112);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

ponto ($pi, $x113, $y113);
    $pi++;

linha ($li, $pi-1, $pi-2);
    $li++;

ponto ($pi, $x114, $y114);
    $pi++;

ponto ($pi, $x115, $y115);
    $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
    $li++;

linha ($li, $pi-1, $pia2);
    $li++;
#FIM DO DESENHO DO BOJÃO

#DESENHO DO MEIA CANA
#Declaração das posições dos pontos
$x116 = 0.137491;
$y116 = 0.249700;
$x117 = 0.137491;
$y117 = 0.233200;
$x118 = 0.153991;
$y118 = 0.233200;
$x119 = 0.157191;
$y119 = 0.233990;
$x120 = 0.156991;
$y120 = 0.230700;
$x121 = 0.156991;
$y121 = 0.233750;
$x122 = 0.159991;
$y122 = 0.233200;
$x123 = 0.137491;
$y123 = 0.233200;
$x124 = 0.137491;
$y124 = 0.255700;
$x125 = 0.137491;
$y125 = 0.233200;
$x126 = 0.114991;
$y126 = 0.233200;

```



```

$x127 = 0.117991;
$y127 = 0.233750;
$x128 = 0.117991;
$y128 = 0.230700;
$x129 = 0.117991;
$y129 = 0.233751;
$x130 = 0.120991;
$y130 = 0.233200;
$x131 = 0.137491;
$y131 = 0.233200;

#definição dos pontos, curvas e linhas
$pc = $pi; #definição do ponto central do
raio do anel

ponto ($pi, $x116, $y116);
  $pi++;
ponto ($pi, $x117, $y117);
  $pi++;
ponto ($pi, $x118, $y118);
  $pi++;
curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;
ponto ($pi, $x119, $y119);
  $pi++;
ponto ($pi, $x120, $y120);
  $pi++;
curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;
ponto ($pi, $x121, $y121);
  $pi++;

ponto ($pi, $x122, $y122);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x123, $y123);
  $pi++;

ponto ($pi, $x124, $y124);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x125, $y125);
  $pi++;

ponto ($pi, $x126, $y126);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x127, $y127);
  $pi++;

ponto ($pi, $x128, $y128);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x129, $y129);
  $pi++;
ponto ($pi, $x130, $y130);
  $pi++;

curva ($li, $pi-3, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

$li++;
ponto ($pi, $x131, $y131);
  $pi++;

curva ($li, $pi-2, $pi-1, $pc);
  $li++;

# término do desenho do anel anti corona
#####
#DESENHO DAS DELIMITAÇÕES DO AR
#1° CIRCULO

$x132 = 0;
$y132 = -2.5 * ($n*0.055+0.369074);
$x133 = 2.5 * ($n*0.055+0.369074);
$y133 = 0;
$x134 = 0;
$y134 = 2.5 * ($n*0.055+0.369074);
$x135 = 0;
$y135 = -3 * ($n*0.055+0.369074);
$x136 = 3 * ($n*0.055+0.369074);
$y136 = 0;
$x137 = 0;
$y137 = 3 * ($n*0.055+0.369074);

#desenho dos pontos, linhas e curvas

linha ($li, $ce, $ce+5);
  $li++;

ponto ($pi, $x132, $y132);
  $pi++;

linha ($li, $ce+5, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x133, $y133);
  $pi++;

curva ($li, $pi-2, $ce, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x134, $y134);
  $pi++;

curva ($li, $pi-2, $ce, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x135, $y135);
  $pi++;

linha ($li, $pi-2, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x136, $y136);
  $pi++;

curva ($li, $pi-2, $ce, $pi-1);
  $li++;

ponto ($pi, $x137, $y137);
  $pi++;

curva ($li, $pi-2, $ce, $pi-1);
  $li++;

linha ($li, $pi-1, $pi-3);
  $li++;

?>

```

9.7. Anexo G – Biblioteca para resolução de problemas eletrostáticos

Biblioteca chamada EleSta_v.pro

```

eps0 = 8.854187818e-12 ;

Group {
  DefineGroup[ DomainCC_Ele ] ;
}
Function {
  DefineFunction[ epsr ] ;
  DefineConstant[ Length = 2.*Pi ] ;
}
FunctionSpace {
  { Name Hgrad_v_Ele ; Type Form0 ;
    BasisFunction {
      { Name sn ; NameOfCoef vn ; Function BF_Node ; Support
        DomainCC_Ele ; Entity NodesOf[ All ] ; }
    }
    Constraint {
      { NameOfCoef vn ; EntityType NodesOf ; NameOfConstraint
        ElectricScalarPotential ; }
    }
  }
}
Formulation {
  { Name Electrostatics_v ; Type FemEquation ;
    Quantity {
      { Name v ; Type Local ; NameOfSpace Hgrad_v_Ele ; }
    }
    Equation {
      Galerkin { [ Length * epsr[]* Dof{d v}, {d v} ] ; In
        DomainCC_Ele ; Jacobian Vol ; Integration GradGrad ; }
    }
  }
}
Resolution {
  { Name EleSta_v ;
    System {
      { Name Sys_Ele ; NameOfFormulation Electrostatics_v ; }
    }
    Operation {
      Generate [Sys_Ele] ; Solve [Sys_Ele] ; SaveSolution [Sys_Ele]
    ;
  }
}
PostProcessing {
  { Name EleSta_v ; NameOfFormulation Electrostatics_v ;
    PostQuantity {
      { Name v ; Value { Local { [ {v} ] ; In
        DomainCC_Ele ; Jacobian Vol; }}}
      { Name e ; Value { Local { [ -{d v} ] ; In
        DomainCC_Ele ; Jacobian Vol; }}}
      { Name em ; Value { Local { [ Norm[-{d v}] ] ; In
        DomainCC_Ele ; Jacobian Vol; }}}
      { Name d ; Value { Local { [ -eps0*epsr[]*{d v} ] ; In
        DomainCC_Ele ; Jacobian Vol; }}}
    }
  }
}

```

9.8. Anexo H – Programa em Python

Programa em Python para medição da RSSI e PER.

```

# PROGRAMA PARA APLICAÇÃO DO API
import serial
import math
import time
import struct
from time import localtime, strftime

# Configura a serial
# para COM# o número que se coloca é n-1 no primeiro parâmetro. Ex COM9 valor 8
n_serial = raw_input("Digite o número da serial = ") #seta a serial
n_serial1 = int(n_serial) - 1
ser = serial.Serial(n_serial1, 9600, timeout=0.5,parity=serial.PARITY_NONE) # seta valores
da serial

# Identificação da base
#ID_base = raw_input('ID_base = ')
ID_base = 0

j=-1

#tempo_amostra = raw_input('Tempo entre amostras = ')

# Cria o vetor Pacote
Pacote = {}

# Cria Pacote de 52 bytes com valor zero em todas as posições
for i in range(1,53): # faz um array com 52 bytes
    Pacote[i-1] = 0

while True:
    try:

        # Identificação do sensor a ser acessado
        ID_sensor = raw_input('ID_sensor = ')
        #ID_sensor = 1
        # Imprime na tela o menu de opções
        print 'Escolha um comandos abaixo e depois enter'
        print '1 - Realiza medidas:'
        print 's - Para sair:'

        Opcao = raw_input('Entre com a Opção = ')

        # Limpa o buffer da serial
        ser.flushInput()

        # Coloca no pacote o ID_sensor e ID_base
        Pacote[8] = int(ID_sensor)
        Pacote[10] = int(ID_base)

        # Leitura de temperatura e luminosidade
        if Opcao == "1":
            num_medidas = raw_input('Entre com o número de medidas = ')
            w = int(num_medidas)+1

            filename1 = strftime("Sensor_%Y_%m_%d_%H-%M-%S.txt")
            print "Arquivo de log: %s" % filename1
            S = open(filename1, 'w')

            i = 0
            #count = 0
            erro = 0
            pac = 0

            for j in range(1,w):
                for k in range(1,53): # transmite pacote
                    TXbyte = chr(Pacote[k-1])
                    ser.write(TXbyte)
                    # Aguarda a resposta do sensor
                    time.sleep(0.5)

```

```

    line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer que recebe da serial
    pela COM
    if len(line) == 52:

        rssid = ord(line[0]) # RSSI_DownLink
        rssi_u = ord(line[2]) # RSSI_UpLink

        #RSSI Downlink
        if rssid > 128:
            RSSId=((rssid-256)/2.0)-74

        else:
            RSSId=(rssid/2.0)-74

        #RSSI Uplink
        if rssi_u > 128:
            RSSIu=((rssi_u-256)/2.0)-74

        else:
            RSSIu=(rssi_u/2.0)-74

        count = ord(line[12]) # contador de pacotes enviados pelo sensor

        # Leitura do AD0
        ad4t = ord(line[28]) # tipo de sensor - no caso está medindo temperatura
        ad4h = ord(line[29]) # alto
        ad4l = ord(line[30]) # baixo
        AD4 = ad4h * 256 + ad4l
        Vpainel = (0.003223 * AD4)*0.04/0.98

        # Leitura do AD1
        ad5t = ord(line[31]) # tipo de sensor - no caso está medindo LDR
        ad5h = ord(line[32]) # alto
        ad5l = ord(line[33]) # baixo
        AD5 = ad5h * 256 + ad5l
        Vbateria = (0.003223 * AD5)*3.68/0.98

    else:
        print 'erro'
        ser.flushInput()

    if i <> count:
        erro = erro + 1
        i = count

    j = j + 1

    if count == 255:
        i = 0

    pac = pac + 1

    #print ad0h,ad0l,'Tensão = ',Vout, ' Temp = ', TEMP, ' AD1 = ', AD1
    print j,'Pacote num = ',count,' RSSIu = ',RSSIu,' dBm ', 'RSSId = ',RSSId,' dBm
    ,
    print >>S,time.asctime(),j,count,'= RSSI =',RSSIu,'= RSSId =',RSSId

    time.sleep(1)

S.close()

if Opcao == "s" or Opcao == "S":# caso o caracter digitado for s
    ser.close() # fecha a porta COM
    print 'Fim da Execução' # escreve na tela
    break

except KeyboardInterrupt:
    ser.close()
    break

```

9.9. Anexo I – Programa realizado em PHP

Script obtido após executar o programa new.php, desenvolvido em linguagem PHP.

```
// Desenho do terminal bola
//Material utilizado na fabricação do terminal bola:
SAE 1020 Forjado Galvanizado a quente
Point(0) = { 0 , 0 , 0.0 , 0.08 };
Point(1) = { 0 , 0.0500918 , 0.0 , 0.08 };
Line(0) = { 0 , 1};
Point(2) = { 0.0142424 , 0.0020708 , 0.0 , 0.08 };
Circle(1) = { 0 , 1 , 2 };
Point(3) = { 0.013442 , 0.0047645 , 0.0 , 0.08 };
Point(4) = { 0.0153129 , 0.0068611 , 0.0 , 0.08 };
Circle(2) = { 2 , 3 , 4 };
Point(5) = { -3.0E-7 , -0.0103 , 0.0 , 0.08 };
Point(6) = { 0.0099091 , 0.0104558 , 0.0 , 0.08 };
Circle(3) = { 4 , 5 , 6 };
Point(7) = { 0.0112016 , 0.0131631 , 0.0 , 0.08 };
Point(8) = { 0.0082016 , 0.0131631 , 0.0 , 0.08 };
Circle(4) = { 6 , 7 , 8 };
Point(9) = { 0.0082016 , 0.0315773 , 0.0 , 0.08 };
Line(5) = { 8 , 9};
Point(10) = { 0.0182016 , 0.0315773 , 0.0 , 0.08 };
Point(11) = { 0.0112016 , 0.0387188 , 0.0 , 0.08 };
Circle(6) = { 9 , 10 , 11 };
Point(12) = { 1.6E-6 , 0.050145 , 0.0 , 0.08 };
Point(13) = { 0.0160016 , 0.050145 , 0.0 , 0.08 };
Circle(7) = { 11 , 12 , 13 };
Point(14) = { 0.0160016 , 0.0577 , 0.0 , 0.08 };
Line(8) = { 13 , 14};
Point(15) = { 0.0160016 , 0.1117 , 0.0 , 0.08 };
Line(9) = { 14 , 15};
Point(16) = { 0.0160016 , 0.1325812 , 0.0 , 0.08 };
Line(10) = { 15 , 16};
Point(17) = { 0.0160016 , 0.1384919 , 0.0 , 0.08 };
Line(11) = { 16 , 17};
Point(18) = { 0.0175016 , 0.1384919 , 0.0 , 0.08 };
Point(19) = { 0.0169391 , 0.1398824 , 0.0 , 0.08 };
Circle(12) = { 17 , 18 , 19 };
Point(20) = { 0.0160016 , 0.1422 , 0.0 , 0.08 };
Point(21) = { 0.0185016 , 0.1422 , 0.0 , 0.08 };
Circle(13) = { 19 , 20 , 21 };
Point(22) = { 0.0160016 , 0.1422 , 0.0 , 0.08 };
Point(23) = { 0.0160016 , 0.1447 , 0.0 , 0.08 };
Circle(14) = { 21 , 22 , 23 };
Point(24) = { 0 , 0.0596991 , 0.0 , 0.08 };
Point(25) = { 0.0087532 , 0.0596991 , 0.0 , 0.08 };
Line(15) = { 24 , 25};
Point(26) = { 0.0087532 , 0.1421991 , 0.0 , 0.08 };
Line(16) = { 25 , 26};
Point(27) = { 0.0112532 , 0.1421991 , 0.0 , 0.08 };
Point(28) = { 0.0112532 , 0.1446991 , 0.0 , 0.08 };
Circle(17) = { 26 , 27 , 28 };
Line(18) = { 28 , 23};
Line(19) = { 24 , 1};
Point(29) = { 0.0170032 , 0.133249 , 0.0 , 0.08 };
Line(20) = { 29 , 16};
Point(30) = { 0.0190032 , 0.133249 , 0.0 , 0.08 };
Line(21) = { 29 , 30};
Point(31) = { 0.0190032 , 0.134749 , 0.0 , 0.08 };
Point(32) = { 0.0205032 , 0.134749 , 0.0 , 0.08 };
Circle(22) = { 30 , 31 , 32 };
Point(33) = { 0.0205032 , 0.146749 , 0.0 , 0.08 };
Line(23) = { 32 , 33};
Point(34) = { 0.0190032 , 0.146749 , 0.0 , 0.08 };
Point(35) = { 0.0190032 , 0.148249 , 0.0 , 0.08 };
Circle(24) = { 33 , 34 , 35 };
Point(36) = { 0.0135032 , 0.148249 , 0.0 , 0.08 };
Line(25) = { 35 , 36};
Point(37) = { 0.0135032 , 0.148249 , 0.0 , 0.08 };
Point(38) = { 0.0135032 , 0.1748383 , 0.0 , 0.08 };
Line(26) = { 37 , 38};
Point(39) = { 0.0145066 , 0.17816 , 0.0 , 0.08 };
Point(40) = { 0.0195032 , 0.1748383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(27) = { 38 , 40 , 39 };
Point(41) = { 0.0188438 , 0.180802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(28) = { 39 , 40 , 41 };
Point(42) = { 0.0672612 , 0.17816 , 0.0 , 0.08 };
Line(29) = { 41 , 42};
Point(43) = { 0.0689915 , 0.1795097 , 0.0 , 0.08 };
Point(44) = { 0.0674515 , 0.1797 , 0.0 , 0.08 };
Circle(30) = { 42 , 44 , 43 };
Point(45) = { 0.0676418 , 0.18124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(31) = { 43 , 44 , 45 };
Point(46) = { 0.0184142 , 0.1870499 , 0.0 , 0.08 };
Line(32) = { 45 , 46};
Point(47) = { 0.0135032 , 0.1929503 , 0.0 , 0.08 };
Point(48) = { 0.0195032 , 0.1929593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(33) = { 46 , 48 , 47 };
Point(49) = { 0.0135032 , 0.2023383 , 0.0 , 0.08 };
Line(34) = { 47 , 49};
Point(50) = { 0.0145066 , 0.20566 , 0.0 , 0.08 };
Point(51) = { 0.0195032 , 0.2023383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(35) = { 49 , 51 , 50 };
Point(52) = { 0.0200262 , 0.2083155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(36) = { 50 , 51 , 52 };
Point(53) = { 0.0532612 , 0.20566 , 0.0 , 0.08 };
Line(37) = { 52 , 53};
Point(54) = { 0.0549915 , 0.2070097 , 0.0 , 0.08 };
Point(55) = { 0.0534515 , 0.2072 , 0.0 , 0.08 };
Circle(38) = { 53 , 55 , 54 };
Point(56) = { 0.0536418 , 0.20874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(39) = { 54 , 55 , 56 };
Point(57) = { 0.0184142 , 0.2129054 , 0.0 , 0.08 };
Line(40) = { 56 , 57};
Point(58) = { 0.0135032 , 0.2188057 , 0.0 , 0.08 };
Point(59) = { 0.0195032 , 0.2188057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(41) = { 57 , 59 , 58 };
Point(60) = { 0.0135032 , 0.2298383 , 0.0 , 0.08 };
Line(42) = { 58 , 60};
Point(61) = { 0.0195032 , 0.2298383 , 0.0 , 0.08 };
Point(62) = { 0.0188438 , 0.235802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(43) = { 60 , 61 , 62 };
Point(63) = { 0.0672612 , 0.23316 , 0.0 , 0.08 };
Line(44) = { 62 , 63};
Point(64) = { 0.0689915 , 0.2345097 , 0.0 , 0.08 };
Point(65) = { 0.0674515 , 0.2347 , 0.0 , 0.08 };
Circle(45) = { 63 , 65 , 64 };
Point(66) = { 0.0676418 , 0.23624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(46) = { 64 , 65 , 66 };
Point(67) = { 0.0184142 , 0.2420499 , 0.0 , 0.08 };
Line(47) = { 66 , 67};
Point(68) = { 0.0135032 , 0.2479503 , 0.0 , 0.08 };
Point(69) = { 0.0195032 , 0.2479593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(48) = { 67 , 69 , 68 };
Point(70) = { 0.0135032 , 0.2573383 , 0.0 , 0.08 };
Line(49) = { 68 , 70};
Point(71) = { 0.0145066 , 0.26066 , 0.0 , 0.08 };
Point(72) = { 0.0195032 , 0.2573383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(50) = { 70 , 72 , 71 };
Point(73) = { 0.0200262 , 0.2633155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(51) = { 71 , 72 , 73 };
Point(74) = { 0.0532612 , 0.26066 , 0.0 , 0.08 };
Line(52) = { 73 , 74};
Point(75) = { 0.0549915 , 0.2620097 , 0.0 , 0.08 };
Point(76) = { 0.0534515 , 0.2622 , 0.0 , 0.08 };
Circle(53) = { 74 , 76 , 75 };
Point(77) = { 0.0536418 , 0.26374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(54) = { 75 , 76 , 77 };
Point(78) = { 0.0184142 , 0.2679054 , 0.0 , 0.08 };
Line(55) = { 77 , 78};
Point(79) = { 0.0135032 , 0.2738057 , 0.0 , 0.08 };
Point(80) = { 0.0195032 , 0.2738057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(56) = { 78 , 80 , 79 };
Point(81) = { 0.0135032 , 0.2848383 , 0.0 , 0.08 };
Line(57) = { 79 , 81};
Point(82) = { 0.0195032 , 0.2848383 , 0.0 , 0.08 };
Point(83) = { 0.0188438 , 0.290802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(58) = { 81 , 82 , 83 };
Point(84) = { 0.0672612 , 0.28816 , 0.0 , 0.08 };
Line(59) = { 83 , 84};
Point(85) = { 0.0689915 , 0.2895097 , 0.0 , 0.08 };
Point(86) = { 0.0674515 , 0.2897 , 0.0 , 0.08 };
Circle(60) = { 84 , 86 , 85 };
Point(87) = { 0.0676418 , 0.29124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(61) = { 85 , 86 , 87 };
Point(88) = { 0.0184142 , 0.2970499 , 0.0 , 0.08 };
Line(62) = { 87 , 88};
Point(89) = { 0.0135032 , 0.3029503 , 0.0 , 0.08 };
Point(90) = { 0.0195032 , 0.3029593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(63) = { 88 , 90 , 89 };
Point(91) = { 0.0135032 , 0.3123383 , 0.0 , 0.08 };
Line(64) = { 89 , 91};
Point(92) = { 0.0145066 , 0.31566 , 0.0 , 0.08 };
Point(93) = { 0.0195032 , 0.3123383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(65) = { 91 , 93 , 92 };
Point(94) = { 0.0200262 , 0.3183155 , 0.0 , 0.08 };
```

```

Circle(66) = { 92, 93, 94 };
Point(95) = { 0.0532612, 0.31566, 0.0, 0.08 };
Line(67) = { 94, 95};
Point(96) = { 0.0549915, 0.3170097, 0.0, 0.08 };
Point(97) = { 0.0534515, 0.3172, 0.0, 0.08 };
Circle(68) = { 95, 97, 96 };
Point(98) = { 0.0536418, 0.31874, 0.0, 0.08 };
Circle(69) = { 96, 97, 98 };
Point(99) = { 0.0184142, 0.3229054, 0.0, 0.08 };
Line(70) = { 98, 99};
Point(100) = { 0.0135032, 0.3288057, 0.0, 0.08 };
Point(101) = { 0.0195032, 0.3288057, 0.0, 0.08 };
Circle(71) = { 99, 101, 100 };
Point(102) = { 0.0135032, 0.3398383, 0.0, 0.08 };
Line(72) = { 100, 102};
Point(103) = { 0.0195032, 0.3398383, 0.0, 0.08 };
Point(104) = { 0.0188438, 0.345802, 0.0, 0.08 };
Circle(73) = { 102, 103, 104 };
Point(105) = { 0.0672612, 0.34316, 0.0, 0.08 };
Line(74) = { 104, 105};
Point(106) = { 0.0689915, 0.3445097, 0.0, 0.08 };
Point(107) = { 0.0674515, 0.3447, 0.0, 0.08 };
Circle(75) = { 105, 107, 106 };
Point(108) = { 0.0676418, 0.34624, 0.0, 0.08 };
Circle(76) = { 106, 107, 108 };
Point(109) = { 0.0184142, 0.3520499, 0.0, 0.08 };
Line(77) = { 108, 109};
Point(110) = { 0.0135032, 0.3579503, 0.0, 0.08 };
Point(111) = { 0.0195032, 0.3579593, 0.0, 0.08 };
Circle(78) = { 109, 111, 110 };
Point(112) = { 0.0135032, 0.3673383, 0.0, 0.08 };
Line(79) = { 110, 112};
Point(113) = { 0.0145066, 0.37066, 0.0, 0.08 };
Point(114) = { 0.0195032, 0.3673383, 0.0, 0.08 };
Circle(80) = { 112, 114, 113 };
Point(115) = { 0.0200262, 0.3733155, 0.0, 0.08 };
Circle(81) = { 113, 114, 115 };
Point(116) = { 0.0532612, 0.37066, 0.0, 0.08 };
Line(82) = { 115, 116};
Point(117) = { 0.0549915, 0.3720097, 0.0, 0.08 };
Point(118) = { 0.0534515, 0.3722, 0.0, 0.08 };
Circle(83) = { 116, 118, 117 };
Point(119) = { 0.0536418, 0.37374, 0.0, 0.08 };
Circle(84) = { 117, 118, 119 };
Point(120) = { 0.0184142, 0.3779054, 0.0, 0.08 };
Line(85) = { 119, 120};
Point(121) = { 0.0135032, 0.3838057, 0.0, 0.08 };
Point(122) = { 0.0195032, 0.3838057, 0.0, 0.08 };
Circle(86) = { 120, 122, 121 };
Point(123) = { 0.0135032, 0.3948383, 0.0, 0.08 };
Line(87) = { 121, 123};
Point(124) = { 0.0195032, 0.3948383, 0.0, 0.08 };
Point(125) = { 0.0188438, 0.400802, 0.0, 0.08 };
Circle(88) = { 123, 124, 125 };
Point(126) = { 0.0672612, 0.39816, 0.0, 0.08 };
Line(89) = { 125, 126};
Point(127) = { 0.0689915, 0.3995097, 0.0, 0.08 };
Point(128) = { 0.0674515, 0.3997, 0.0, 0.08 };
Circle(90) = { 126, 128, 127 };
Point(129) = { 0.0676418, 0.40124, 0.0, 0.08 };
Circle(91) = { 127, 128, 129 };
Point(130) = { 0.0184142, 0.4070499, 0.0, 0.08 };
Line(92) = { 129, 130};
Point(131) = { 0.0135032, 0.4129503, 0.0, 0.08 };
Point(132) = { 0.0195032, 0.4129593, 0.0, 0.08 };
Circle(93) = { 130, 132, 131 };
Point(133) = { 0.0135032, 0.4223383, 0.0, 0.08 };
Line(94) = { 131, 133};
Point(134) = { 0.0145066, 0.42566, 0.0, 0.08 };
Point(135) = { 0.0195032, 0.4223383, 0.0, 0.08 };
Circle(95) = { 133, 135, 134 };
Point(136) = { 0.0200262, 0.4283155, 0.0, 0.08 };
Circle(96) = { 134, 135, 136 };
Point(137) = { 0.0532612, 0.42566, 0.0, 0.08 };
Line(97) = { 136, 137};
Point(138) = { 0.0549915, 0.4270097, 0.0, 0.08 };
Point(139) = { 0.0534515, 0.4272, 0.0, 0.08 };
Circle(98) = { 137, 139, 138 };
Point(140) = { 0.0536418, 0.42874, 0.0, 0.08 };
Circle(99) = { 138, 139, 140 };
Point(141) = { 0.0184142, 0.4329054, 0.0, 0.08 };
Line(100) = { 140, 141};
Point(142) = { 0.0135032, 0.4388057, 0.0, 0.08 };
Point(143) = { 0.0195032, 0.4388057, 0.0, 0.08 };
Circle(101) = { 141, 143, 142 };
Point(144) = { 0.0135032, 0.4498383, 0.0, 0.08 };
Line(102) = { 142, 144};
Point(145) = { 0.0195032, 0.4498383, 0.0, 0.08 };
Point(146) = { 0.0188438, 0.455802, 0.0, 0.08 };
Circle(103) = { 144, 145, 146 };
Point(147) = { 0.0672612, 0.45316, 0.0, 0.08 };
Line(104) = { 146, 147};
Point(148) = { 0.0689915, 0.4545097, 0.0, 0.08 };
Point(149) = { 0.0674515, 0.4547, 0.0, 0.08 };
Circle(105) = { 147, 149, 148 };
Point(150) = { 0.0676418, 0.45624, 0.0, 0.08 };
Circle(106) = { 148, 149, 150 };
Point(151) = { 0.0184142, 0.4620499, 0.0, 0.08 };
Line(107) = { 150, 151};
Point(152) = { 0.0135032, 0.4679503, 0.0, 0.08 };
Point(153) = { 0.0195032, 0.4679593, 0.0, 0.08 };
Circle(108) = { 151, 153, 152 };
Point(154) = { 0.0135032, 0.4773383, 0.0, 0.08 };
Line(109) = { 152, 154};
Point(155) = { 0.0145066, 0.48066, 0.0, 0.08 };
Point(156) = { 0.0195032, 0.4773383, 0.0, 0.08 };
Circle(110) = { 154, 156, 155 };
Point(157) = { 0.0200262, 0.4833155, 0.0, 0.08 };
Circle(111) = { 155, 156, 157 };
Point(158) = { 0.0532612, 0.48066, 0.0, 0.08 };
Line(112) = { 157, 158};
Point(159) = { 0.0549915, 0.4820097, 0.0, 0.08 };
Point(160) = { 0.0534515, 0.4822, 0.0, 0.08 };
Circle(113) = { 158, 160, 159 };
Point(161) = { 0.0536418, 0.48374, 0.0, 0.08 };
Circle(114) = { 159, 160, 161 };
Point(162) = { 0.0184142, 0.4879054, 0.0, 0.08 };
Line(115) = { 161, 162};
Point(163) = { 0.0135032, 0.4938057, 0.0, 0.08 };
Point(164) = { 0.0195032, 0.4938057, 0.0, 0.08 };
Circle(116) = { 162, 164, 163 };
Point(165) = { 0.0135032, 0.5048383, 0.0, 0.08 };
Line(117) = { 163, 165};
Point(166) = { 0.0195032, 0.5048383, 0.0, 0.08 };
Point(167) = { 0.0188438, 0.510802, 0.0, 0.08 };
Circle(118) = { 165, 166, 167 };
Point(168) = { 0.0672612, 0.50816, 0.0, 0.08 };
Line(119) = { 167, 168};
Point(169) = { 0.0689915, 0.5095097, 0.0, 0.08 };
Point(170) = { 0.0674515, 0.5097, 0.0, 0.08 };
Circle(120) = { 168, 170, 169 };
Point(171) = { 0.0676418, 0.51124, 0.0, 0.08 };
Circle(121) = { 169, 170, 171 };
Point(172) = { 0.0184142, 0.5170499, 0.0, 0.08 };
Line(122) = { 171, 172};
Point(173) = { 0.0135032, 0.5229503, 0.0, 0.08 };
Point(174) = { 0.0195032, 0.5229593, 0.0, 0.08 };
Circle(123) = { 172, 174, 173 };
Point(175) = { 0.0135032, 0.5323383, 0.0, 0.08 };
Line(124) = { 173, 175};
Point(176) = { 0.0145066, 0.53566, 0.0, 0.08 };
Point(177) = { 0.0195032, 0.5323383, 0.0, 0.08 };
Circle(125) = { 175, 177, 176 };
Point(178) = { 0.0200262, 0.5383155, 0.0, 0.08 };
Circle(126) = { 176, 177, 178 };
Point(179) = { 0.0532612, 0.53566, 0.0, 0.08 };
Line(127) = { 178, 179};
Point(180) = { 0.0549915, 0.5370097, 0.0, 0.08 };
Point(181) = { 0.0534515, 0.5372, 0.0, 0.08 };
Circle(128) = { 179, 181, 180 };
Point(182) = { 0.0536418, 0.53874, 0.0, 0.08 };
Circle(129) = { 180, 181, 182 };
Point(183) = { 0.0184142, 0.5429054, 0.0, 0.08 };
Line(130) = { 182, 183};
Point(184) = { 0.0135032, 0.5488057, 0.0, 0.08 };
Point(185) = { 0.0195032, 0.5488057, 0.0, 0.08 };
Circle(131) = { 183, 185, 184 };
Point(186) = { 0.0135032, 0.5598383, 0.0, 0.08 };
Line(132) = { 184, 186};
Point(187) = { 0.0195032, 0.5598383, 0.0, 0.08 };
Point(188) = { 0.0188438, 0.565802, 0.0, 0.08 };
Circle(133) = { 186, 187, 188 };
Point(189) = { 0.0672612, 0.56316, 0.0, 0.08 };
Line(134) = { 188, 189};
Point(190) = { 0.0689915, 0.5645097, 0.0, 0.08 };
Point(191) = { 0.0674515, 0.5647, 0.0, 0.08 };
Circle(135) = { 189, 191, 190 };
Point(192) = { 0.0676418, 0.56624, 0.0, 0.08 };
Circle(136) = { 190, 191, 192 };
Point(193) = { 0.0184142, 0.5720499, 0.0, 0.08 };
Line(137) = { 192, 193};
Point(194) = { 0.0135032, 0.5779503, 0.0, 0.08 };
Point(195) = { 0.0195032, 0.5779593, 0.0, 0.08 };
Circle(138) = { 193, 195, 194 };
Point(196) = { 0.0135032, 0.5873383, 0.0, 0.08 };
Line(139) = { 194, 196};
Point(197) = { 0.0145066, 0.59066, 0.0, 0.08 };
Point(198) = { 0.0195032, 0.5873383, 0.0, 0.08 };
Circle(140) = { 196, 198, 197 };
Point(199) = { 0.0200262, 0.5933155, 0.0, 0.08 };
Circle(141) = { 197, 198, 199 };
Point(200) = { 0.0532612, 0.59066, 0.0, 0.08 };
Line(142) = { 199, 200};
Point(201) = { 0.0549915, 0.5920097, 0.0, 0.08 };
Point(202) = { 0.0534515, 0.5922, 0.0, 0.08 };
Circle(143) = { 200, 202, 201 };

```

```

Point(203) = { 0.0536418, 0.59374, 0.0, 0.08 };
Circle(144) = { 201, 202, 203 };
Point(204) = { 0.0184142, 0.5979054, 0.0, 0.08 };
Line(145) = { 203, 204};
Point(205) = { 0.0135032, 0.6038057, 0.0, 0.08 };
Point(206) = { 0.0195032, 0.6038057, 0.0, 0.08 };
Circle(146) = { 204, 206, 205 };
Point(207) = { 0.0135032, 0.6148383, 0.0, 0.08 };
Line(147) = { 205, 207};
Point(208) = { 0.0195032, 0.6148383, 0.0, 0.08 };
Point(209) = { 0.0188438, 0.620802, 0.0, 0.08 };
Circle(148) = { 207, 208, 209 };
Point(210) = { 0.0672612, 0.61816, 0.0, 0.08 };
Line(149) = { 209, 210};
Point(211) = { 0.0689915, 0.6195097, 0.0, 0.08 };
Point(212) = { 0.0674515, 0.6197, 0.0, 0.08 };
Circle(150) = { 210, 212, 211 };
Point(213) = { 0.0676418, 0.62124, 0.0, 0.08 };
Circle(151) = { 211, 212, 213 };
Point(214) = { 0.0184142, 0.6270499, 0.0, 0.08 };
Line(152) = { 213, 214};
Point(215) = { 0.0135032, 0.6329503, 0.0, 0.08 };
Point(216) = { 0.0195032, 0.6329593, 0.0, 0.08 };
Circle(153) = { 214, 216, 215 };
Point(217) = { 0.0135032, 0.6423383, 0.0, 0.08 };
Line(154) = { 215, 217};
Point(218) = { 0.0145066, 0.64566, 0.0, 0.08 };
Point(219) = { 0.0195032, 0.6423383, 0.0, 0.08 };
Circle(155) = { 217, 219, 218 };
Point(220) = { 0.0200262, 0.6483155, 0.0, 0.08 };
Circle(156) = { 218, 219, 220 };
Point(221) = { 0.0532612, 0.64566, 0.0, 0.08 };
Line(157) = { 220, 221};
Point(222) = { 0.0549915, 0.6470097, 0.0, 0.08 };
Point(223) = { 0.0534515, 0.6472, 0.0, 0.08 };
Circle(158) = { 221, 223, 222 };
Point(224) = { 0.0536418, 0.64874, 0.0, 0.08 };
Circle(159) = { 222, 223, 224 };
Point(225) = { 0.0184142, 0.6529054, 0.0, 0.08 };
Line(160) = { 224, 225};
Point(226) = { 0.0135032, 0.6588057, 0.0, 0.08 };
Point(227) = { 0.0195032, 0.6588057, 0.0, 0.08 };
Circle(161) = { 225, 227, 226 };
Point(228) = { 0.0135032, 0.6698383, 0.0, 0.08 };
Line(162) = { 226, 228};
Point(229) = { 0.0195032, 0.6698383, 0.0, 0.08 };
Point(230) = { 0.0188438, 0.675802, 0.0, 0.08 };
Circle(163) = { 228, 229, 230 };
Point(231) = { 0.0672612, 0.67316, 0.0, 0.08 };
Line(164) = { 230, 231};
Point(232) = { 0.0689915, 0.6745097, 0.0, 0.08 };
Point(233) = { 0.0674515, 0.6747, 0.0, 0.08 };
Circle(165) = { 231, 233, 232 };
Point(234) = { 0.0676418, 0.67624, 0.0, 0.08 };
Circle(166) = { 232, 233, 234 };
Point(235) = { 0.0184142, 0.6820499, 0.0, 0.08 };
Line(167) = { 234, 235};
Point(236) = { 0.0135032, 0.6879503, 0.0, 0.08 };
Point(237) = { 0.0195032, 0.6879593, 0.0, 0.08 };
Circle(168) = { 235, 237, 236 };
Point(238) = { 0.0135032, 0.6973383, 0.0, 0.08 };
Line(169) = { 236, 238};
Point(239) = { 0.0145066, 0.70066, 0.0, 0.08 };
Point(240) = { 0.0195032, 0.6973383, 0.0, 0.08 };
Circle(170) = { 238, 240, 239 };
Point(241) = { 0.0200262, 0.7033155, 0.0, 0.08 };
Circle(171) = { 239, 240, 241 };
Point(242) = { 0.0532612, 0.70066, 0.0, 0.08 };
Line(172) = { 241, 242};
Point(243) = { 0.0549915, 0.7020097, 0.0, 0.08 };
Point(244) = { 0.0534515, 0.7022, 0.0, 0.08 };
Circle(173) = { 242, 244, 243 };
Point(245) = { 0.0536418, 0.70374, 0.0, 0.08 };
Circle(174) = { 243, 244, 245 };
Point(246) = { 0.0184142, 0.7079054, 0.0, 0.08 };
Line(175) = { 245, 246};
Point(247) = { 0.0135032, 0.7138057, 0.0, 0.08 };
Point(248) = { 0.0195032, 0.7138057, 0.0, 0.08 };
Circle(176) = { 246, 248, 247 };
Point(249) = { 0.0135032, 0.7248383, 0.0, 0.08 };
Line(177) = { 247, 249};
Point(250) = { 0.0195032, 0.7248383, 0.0, 0.08 };
Point(251) = { 0.0188438, 0.730802, 0.0, 0.08 };
Circle(178) = { 249, 250, 251 };
Point(252) = { 0.0672612, 0.72816, 0.0, 0.08 };
Line(179) = { 251, 252};
Point(253) = { 0.0689915, 0.7295097, 0.0, 0.08 };
Point(254) = { 0.0674515, 0.7297, 0.0, 0.08 };
Circle(180) = { 252, 254, 253 };
Point(255) = { 0.0676418, 0.73124, 0.0, 0.08 };
Circle(181) = { 253, 254, 255 };
Point(256) = { 0.0184142, 0.7370499, 0.0, 0.08 };
Line(182) = { 255, 256};

Point(257) = { 0.0135032, 0.7429503, 0.0, 0.08 };
Point(258) = { 0.0195032, 0.7429593, 0.0, 0.08 };
Circle(183) = { 256, 258, 257 };
Point(259) = { 0.0135032, 0.7523383, 0.0, 0.08 };
Line(184) = { 257, 259};
Point(260) = { 0.0145066, 0.75566, 0.0, 0.08 };
Point(261) = { 0.0195032, 0.7523383, 0.0, 0.08 };
Circle(185) = { 259, 261, 260 };
Point(262) = { 0.0200262, 0.7583155, 0.0, 0.08 };
Circle(186) = { 260, 261, 262 };
Point(263) = { 0.0532612, 0.75566, 0.0, 0.08 };
Line(187) = { 262, 263};
Point(264) = { 0.0549915, 0.7570097, 0.0, 0.08 };
Point(265) = { 0.0534515, 0.7572, 0.0, 0.08 };
Circle(188) = { 263, 265, 264 };
Point(266) = { 0.0536418, 0.75874, 0.0, 0.08 };
Circle(189) = { 264, 265, 266 };
Point(267) = { 0.0184142, 0.7629054, 0.0, 0.08 };
Line(190) = { 266, 267};
Point(268) = { 0.0135032, 0.7688057, 0.0, 0.08 };
Point(269) = { 0.0195032, 0.7688057, 0.0, 0.08 };
Circle(191) = { 267, 269, 268 };
Point(270) = { 0.0135032, 0.7798383, 0.0, 0.08 };
Line(192) = { 268, 270};
Point(271) = { 0.0195032, 0.7798383, 0.0, 0.08 };
Point(272) = { 0.0188438, 0.785802, 0.0, 0.08 };
Circle(193) = { 270, 271, 272 };
Point(273) = { 0.0672612, 0.78316, 0.0, 0.08 };
Line(194) = { 272, 273};
Point(274) = { 0.0689915, 0.7845097, 0.0, 0.08 };
Point(275) = { 0.0674515, 0.7847, 0.0, 0.08 };
Circle(195) = { 273, 275, 274 };
Point(276) = { 0.0676418, 0.78624, 0.0, 0.08 };
Circle(196) = { 274, 275, 276 };
Point(277) = { 0.0184142, 0.7920499, 0.0, 0.08 };
Line(197) = { 276, 277};
Point(278) = { 0.0135032, 0.7979503, 0.0, 0.08 };
Point(279) = { 0.0195032, 0.7979593, 0.0, 0.08 };
Circle(198) = { 277, 279, 278 };
Point(280) = { 0.0135032, 0.8073383, 0.0, 0.08 };
Line(199) = { 278, 280};
Point(281) = { 0.0145066, 0.81066, 0.0, 0.08 };
Point(282) = { 0.0195032, 0.8073383, 0.0, 0.08 };
Circle(200) = { 280, 282, 281 };
Point(283) = { 0.0200262, 0.8133155, 0.0, 0.08 };
Circle(201) = { 281, 282, 283 };
Point(284) = { 0.0532612, 0.81066, 0.0, 0.08 };
Line(202) = { 283, 284};
Point(285) = { 0.0549915, 0.8120097, 0.0, 0.08 };
Point(286) = { 0.0534515, 0.8122, 0.0, 0.08 };
Circle(203) = { 284, 286, 285 };
Point(287) = { 0.0536418, 0.81374, 0.0, 0.08 };
Circle(204) = { 285, 286, 287 };
Point(288) = { 0.0184142, 0.8179054, 0.0, 0.08 };
Line(205) = { 287, 288};
Point(289) = { 0.0135032, 0.8238057, 0.0, 0.08 };
Point(290) = { 0.0195032, 0.8238057, 0.0, 0.08 };
Circle(206) = { 288, 290, 289 };
Point(291) = { 0.0135032, 0.8348383, 0.0, 0.08 };
Line(207) = { 289, 291};
Point(292) = { 0.0195032, 0.8348383, 0.0, 0.08 };
Point(293) = { 0.0188438, 0.840802, 0.0, 0.08 };
Circle(208) = { 291, 292, 293 };
Point(294) = { 0.0672612, 0.83816, 0.0, 0.08 };
Line(209) = { 293, 294};
Point(295) = { 0.0689915, 0.8395097, 0.0, 0.08 };
Point(296) = { 0.0674515, 0.8397, 0.0, 0.08 };
Circle(210) = { 294, 296, 295 };
Point(297) = { 0.0676418, 0.84124, 0.0, 0.08 };
Circle(211) = { 295, 296, 297 };
Point(298) = { 0.0184142, 0.8470499, 0.0, 0.08 };
Line(212) = { 297, 298};
Point(299) = { 0.0135032, 0.8529503, 0.0, 0.08 };
Point(300) = { 0.0195032, 0.8529593, 0.0, 0.08 };
Circle(213) = { 298, 300, 299 };
Point(301) = { 0.0135032, 0.8623383, 0.0, 0.08 };
Line(214) = { 299, 301};
Point(302) = { 0.0145066, 0.86566, 0.0, 0.08 };
Point(303) = { 0.0195032, 0.8623383, 0.0, 0.08 };
Circle(215) = { 301, 303, 302 };
Point(304) = { 0.0200262, 0.8683155, 0.0, 0.08 };
Circle(216) = { 302, 303, 304 };
Point(305) = { 0.0532612, 0.86566, 0.0, 0.08 };
Line(217) = { 304, 305};
Point(306) = { 0.0549915, 0.8670097, 0.0, 0.08 };
Point(307) = { 0.0534515, 0.8672, 0.0, 0.08 };
Circle(218) = { 305, 307, 306 };
Point(308) = { 0.0536418, 0.86874, 0.0, 0.08 };
Circle(219) = { 306, 307, 308 };
Point(309) = { 0.0184142, 0.8729054, 0.0, 0.08 };
Line(220) = { 308, 309};
Point(310) = { 0.0135032, 0.8788057, 0.0, 0.08 };
Point(311) = { 0.0195032, 0.8788057, 0.0, 0.08 };

```

```

Circle(221) = { 309 , 311 , 310 };
Point(312) = { 0.0135032 , 0.8898383 , 0.0 , 0.08 };
Line(222) = { 310 , 312};
Point(313) = { 0.0195032 , 0.8898383 , 0.0 , 0.08 };
Point(314) = { 0.0188438 , 0.895802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(223) = { 312 , 313 , 314 };
Point(315) = { 0.0672612 , 0.89316 , 0.0 , 0.08 };
Line(224) = { 314 , 315};
Point(316) = { 0.0689915 , 0.8945097 , 0.0 , 0.08 };
Point(317) = { 0.0674515 , 0.8947 , 0.0 , 0.08 };
Circle(225) = { 315 , 317 , 316 };
Point(318) = { 0.0676418 , 0.89624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(226) = { 316 , 317 , 318 };
Point(319) = { 0.0184142 , 0.9020499 , 0.0 , 0.08 };
Line(227) = { 318 , 319};
Point(320) = { 0.0135032 , 0.9079503 , 0.0 , 0.08 };
Point(321) = { 0.0195032 , 0.9079593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(228) = { 319 , 321 , 320 };
Point(322) = { 0.0135032 , 0.9173383 , 0.0 , 0.08 };
Line(229) = { 320 , 322};
Point(323) = { 0.0145066 , 0.92066 , 0.0 , 0.08 };
Point(324) = { 0.0195032 , 0.9173383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(230) = { 322 , 324 , 323 };
Point(325) = { 0.0200262 , 0.9233155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(231) = { 323 , 324 , 325 };
Point(326) = { 0.0532612 , 0.92066 , 0.0 , 0.08 };
Line(232) = { 325 , 326};
Point(327) = { 0.0549915 , 0.9220097 , 0.0 , 0.08 };
Point(328) = { 0.0534515 , 0.9222 , 0.0 , 0.08 };
Circle(233) = { 326 , 328 , 327 };
Point(329) = { 0.0536418 , 0.92374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(234) = { 327 , 328 , 329 };
Point(330) = { 0.0184142 , 0.9279054 , 0.0 , 0.08 };
Line(235) = { 329 , 330};
Point(331) = { 0.0135032 , 0.9338057 , 0.0 , 0.08 };
Point(332) = { 0.0195032 , 0.9338057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(236) = { 330 , 332 , 331 };
Point(333) = { 0.0135032 , 0.9448383 , 0.0 , 0.08 };
Line(237) = { 331 , 333};
Point(334) = { 0.0195032 , 0.9448383 , 0.0 , 0.08 };
Point(335) = { 0.0188438 , 0.950802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(238) = { 333 , 334 , 335 };
Point(336) = { 0.0672612 , 0.94816 , 0.0 , 0.08 };
Line(239) = { 335 , 336};
Point(337) = { 0.0689915 , 0.9495097 , 0.0 , 0.08 };
Point(338) = { 0.0674515 , 0.9497 , 0.0 , 0.08 };
Circle(240) = { 336 , 338 , 337 };
Point(339) = { 0.0676418 , 0.95124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(241) = { 337 , 338 , 339 };
Point(340) = { 0.0184142 , 0.9570499 , 0.0 , 0.08 };
Line(242) = { 339 , 340};
Point(341) = { 0.0135032 , 0.9629503 , 0.0 , 0.08 };
Point(342) = { 0.0195032 , 0.9629593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(243) = { 340 , 342 , 341 };
Point(343) = { 0.0135032 , 0.9723383 , 0.0 , 0.08 };
Line(244) = { 341 , 343};
Point(344) = { 0.0145066 , 0.97566 , 0.0 , 0.08 };
Point(345) = { 0.0195032 , 0.9723383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(245) = { 343 , 345 , 344 };
Point(346) = { 0.0200262 , 0.9783155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(246) = { 344 , 345 , 346 };
Point(347) = { 0.0532612 , 0.97566 , 0.0 , 0.08 };
Line(247) = { 346 , 347};
Point(348) = { 0.0549915 , 0.9770097 , 0.0 , 0.08 };
Point(349) = { 0.0534515 , 0.9772 , 0.0 , 0.08 };
Circle(248) = { 347 , 349 , 348 };
Point(350) = { 0.0536418 , 0.97874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(249) = { 348 , 349 , 350 };
Point(351) = { 0.0184142 , 0.9829054 , 0.0 , 0.08 };
Line(250) = { 350 , 351};
Point(352) = { 0.0135032 , 0.9888057 , 0.0 , 0.08 };
Point(353) = { 0.0195032 , 0.9888057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(251) = { 351 , 353 , 352 };
Point(354) = { 0.0135032 , 0.9998383 , 0.0 , 0.08 };
Line(252) = { 352 , 354};
Point(355) = { 0.0195032 , 0.9998383 , 0.0 , 0.08 };
Point(356) = { 0.0188438 , 1.005802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(253) = { 354 , 355 , 356 };
Point(357) = { 0.0672612 , 1.00316 , 0.0 , 0.08 };
Line(254) = { 356 , 357};
Point(358) = { 0.0689915 , 1.0045097 , 0.0 , 0.08 };
Point(359) = { 0.0674515 , 1.0047 , 0.0 , 0.08 };
Circle(255) = { 357 , 359 , 358 };
Point(360) = { 0.0676418 , 1.00624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(256) = { 358 , 359 , 360 };
Point(361) = { 0.0184142 , 1.0120499 , 0.0 , 0.08 };
Line(257) = { 360 , 361};
Point(362) = { 0.0135032 , 1.0179503 , 0.0 , 0.08 };
Point(363) = { 0.0195032 , 1.0179593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(258) = { 361 , 363 , 362 };
Point(364) = { 0.0135032 , 1.0273383 , 0.0 , 0.08 };
Line(259) = { 362 , 364};
Point(365) = { 0.0145066 , 1.03066 , 0.0 , 0.08 };
Point(366) = { 0.0195032 , 1.0273383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(260) = { 364 , 366 , 365 };
Point(367) = { 0.0200262 , 1.0333155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(261) = { 365 , 366 , 367 };
Point(368) = { 0.0532612 , 1.03066 , 0.0 , 0.08 };
Line(262) = { 367 , 368};
Point(369) = { 0.0549915 , 1.0320097 , 0.0 , 0.08 };
Point(370) = { 0.0534515 , 1.0322 , 0.0 , 0.08 };
Circle(263) = { 368 , 370 , 369 };
Point(371) = { 0.0536418 , 1.03374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(264) = { 369 , 370 , 371 };
Point(372) = { 0.0184142 , 1.0379054 , 0.0 , 0.08 };
Line(265) = { 371 , 372};
Point(373) = { 0.0135032 , 1.0438057 , 0.0 , 0.08 };
Point(374) = { 0.0195032 , 1.0438057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(266) = { 372 , 374 , 373 };
Point(375) = { 0.0135032 , 1.0548383 , 0.0 , 0.08 };
Line(267) = { 373 , 375};
Point(376) = { 0.0195032 , 1.0548383 , 0.0 , 0.08 };
Point(377) = { 0.0188438 , 1.060802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(268) = { 375 , 376 , 377 };
Point(378) = { 0.0672612 , 1.05816 , 0.0 , 0.08 };
Line(269) = { 377 , 378};
Point(379) = { 0.0689915 , 1.0595097 , 0.0 , 0.08 };
Point(380) = { 0.0674515 , 1.0597 , 0.0 , 0.08 };
Circle(270) = { 378 , 380 , 379 };
Point(381) = { 0.0676418 , 1.06124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(271) = { 379 , 380 , 381 };
Point(382) = { 0.0184142 , 1.0670499 , 0.0 , 0.08 };
Line(272) = { 381 , 382};
Point(383) = { 0.0135032 , 1.0729503 , 0.0 , 0.08 };
Point(384) = { 0.0195032 , 1.0729593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(273) = { 382 , 384 , 383 };
Point(385) = { 0.0135032 , 1.0823383 , 0.0 , 0.08 };
Line(274) = { 383 , 385};
Point(386) = { 0.0145066 , 1.08566 , 0.0 , 0.08 };
Point(387) = { 0.0195032 , 1.0823383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(275) = { 385 , 387 , 386 };
Point(388) = { 0.0200262 , 1.0883155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(276) = { 386 , 387 , 388 };
Point(389) = { 0.0532612 , 1.08566 , 0.0 , 0.08 };
Line(277) = { 388 , 389};
Point(390) = { 0.0549915 , 1.0870097 , 0.0 , 0.08 };
Point(391) = { 0.0534515 , 1.0872 , 0.0 , 0.08 };
Circle(278) = { 389 , 391 , 390 };
Point(392) = { 0.0536418 , 1.08874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(279) = { 390 , 391 , 392 };
Point(393) = { 0.0184142 , 1.0929054 , 0.0 , 0.08 };
Line(280) = { 392 , 393};
Point(394) = { 0.0135032 , 1.0988057 , 0.0 , 0.08 };
Point(395) = { 0.0195032 , 1.0988057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(281) = { 393 , 395 , 394 };
Point(396) = { 0.0135032 , 1.1098383 , 0.0 , 0.08 };
Line(282) = { 394 , 396};
Point(397) = { 0.0195032 , 1.1098383 , 0.0 , 0.08 };
Point(398) = { 0.0188438 , 1.115802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(283) = { 396 , 397 , 398 };
Point(399) = { 0.0672612 , 1.11316 , 0.0 , 0.08 };
Line(284) = { 398 , 399};
Point(400) = { 0.0689915 , 1.1145097 , 0.0 , 0.08 };
Point(401) = { 0.0674515 , 1.1147 , 0.0 , 0.08 };
Circle(285) = { 399 , 401 , 400 };
Point(402) = { 0.0676418 , 1.11624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(286) = { 400 , 401 , 402 };
Point(403) = { 0.0184142 , 1.1220499 , 0.0 , 0.08 };
Line(287) = { 402 , 403};
Point(404) = { 0.0135032 , 1.1279503 , 0.0 , 0.08 };
Point(405) = { 0.0195032 , 1.1279593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(288) = { 403 , 405 , 404 };
Point(406) = { 0.0135032 , 1.1373383 , 0.0 , 0.08 };
Line(289) = { 404 , 406};
Point(407) = { 0.0145066 , 1.14066 , 0.0 , 0.08 };
Point(408) = { 0.0195032 , 1.1373383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(290) = { 406 , 408 , 407 };
Point(409) = { 0.0200262 , 1.1433155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(291) = { 407 , 408 , 409 };
Point(410) = { 0.0532612 , 1.14066 , 0.0 , 0.08 };
Line(292) = { 409 , 410};
Point(411) = { 0.0549915 , 1.1420097 , 0.0 , 0.08 };
Point(412) = { 0.0534515 , 1.1422 , 0.0 , 0.08 };
Circle(293) = { 410 , 412 , 411 };
Point(413) = { 0.0536418 , 1.14374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(294) = { 411 , 412 , 413 };
Point(414) = { 0.0184142 , 1.1479054 , 0.0 , 0.08 };
Line(295) = { 413 , 414};
Point(415) = { 0.0135032 , 1.1538057 , 0.0 , 0.08 };
Point(416) = { 0.0195032 , 1.1538057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(296) = { 414 , 416 , 415 };
Point(417) = { 0.0135032 , 1.1648383 , 0.0 , 0.08 };
Line(297) = { 415 , 417};
Point(418) = { 0.0195032 , 1.1648383 , 0.0 , 0.08 };
Point(419) = { 0.0188438 , 1.170802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(298) = { 417 , 418 , 419 };

```



```

Point(420) = { 0.0672612, 1.16816, 0.0, 0.08 };
Line(299) = { 419, 420};
Point(421) = { 0.0689915, 1.1695097, 0.0, 0.08 };
Point(422) = { 0.0674515, 1.1697, 0.0, 0.08 };
Circle(300) = { 420, 422, 421 };
Point(423) = { 0.0676418, 1.17124, 0.0, 0.08 };
Circle(301) = { 421, 422, 423 };
Point(424) = { 0.0184142, 1.1770499, 0.0, 0.08 };
Line(302) = { 423, 424};
Point(425) = { 0.0135032, 1.1829503, 0.0, 0.08 };
Point(426) = { 0.0195032, 1.1829593, 0.0, 0.08 };
Circle(303) = { 424, 426, 425 };
Point(427) = { 0.0135032, 1.1923383, 0.0, 0.08 };
Line(304) = { 425, 427};
Point(428) = { 0.0145066, 1.19566, 0.0, 0.08 };
Point(429) = { 0.0195032, 1.1923383, 0.0, 0.08 };
Circle(305) = { 427, 429, 428 };
Point(430) = { 0.0200262, 1.1983155, 0.0, 0.08 };
Circle(306) = { 428, 429, 430 };
Point(431) = { 0.0532612, 1.19566, 0.0, 0.08 };
Line(307) = { 430, 431};
Point(432) = { 0.0549915, 1.1970097, 0.0, 0.08 };
Point(433) = { 0.0534515, 1.1972, 0.0, 0.08 };
Circle(308) = { 431, 433, 432 };
Point(434) = { 0.0536418, 1.19874, 0.0, 0.08 };
Circle(309) = { 432, 433, 434 };
Point(435) = { 0.0184142, 1.2029054, 0.0, 0.08 };
Line(310) = { 434, 435};
Point(436) = { 0.0135032, 1.2088057, 0.0, 0.08 };
Point(437) = { 0.0195032, 1.2088057, 0.0, 0.08 };
Circle(311) = { 435, 437, 436 };
Point(438) = { 0.0135032, 1.2198383, 0.0, 0.08 };
Line(312) = { 436, 438};
Point(439) = { 0.0195032, 1.2198383, 0.0, 0.08 };
Point(440) = { 0.0188438, 1.225802, 0.0, 0.08 };
Circle(313) = { 438, 439, 440 };
Point(441) = { 0.0672612, 1.22316, 0.0, 0.08 };
Line(314) = { 440, 441};
Point(442) = { 0.0689915, 1.2245097, 0.0, 0.08 };
Point(443) = { 0.0674515, 1.2247, 0.0, 0.08 };
Circle(315) = { 441, 443, 442 };
Point(444) = { 0.0676418, 1.22624, 0.0, 0.08 };
Circle(316) = { 442, 443, 444 };
Point(445) = { 0.0184142, 1.2320499, 0.0, 0.08 };
Line(317) = { 444, 445};
Point(446) = { 0.0135032, 1.2379503, 0.0, 0.08 };
Point(447) = { 0.0195032, 1.2379593, 0.0, 0.08 };
Circle(318) = { 445, 447, 446 };
Point(448) = { 0.0135032, 1.2473383, 0.0, 0.08 };
Line(319) = { 446, 448};
Point(449) = { 0.0145066, 1.25066, 0.0, 0.08 };
Point(450) = { 0.0195032, 1.2473383, 0.0, 0.08 };
Circle(320) = { 448, 450, 449 };
Point(451) = { 0.0200262, 1.2533155, 0.0, 0.08 };
Circle(321) = { 449, 450, 451 };
Point(452) = { 0.0532612, 1.25066, 0.0, 0.08 };
Line(322) = { 451, 452};
Point(453) = { 0.0549915, 1.2520097, 0.0, 0.08 };
Point(454) = { 0.0534515, 1.2522, 0.0, 0.08 };
Circle(323) = { 452, 454, 453 };
Point(455) = { 0.0536418, 1.25374, 0.0, 0.08 };
Circle(324) = { 453, 454, 455 };
Point(456) = { 0.0184142, 1.2579054, 0.0, 0.08 };
Line(325) = { 455, 456};
Point(457) = { 0.0135032, 1.2638057, 0.0, 0.08 };
Point(458) = { 0.0195032, 1.2638057, 0.0, 0.08 };
Circle(326) = { 456, 458, 457 };
Point(459) = { 0.0135032, 1.2748383, 0.0, 0.08 };
Line(327) = { 457, 459};
Point(460) = { 0.0195032, 1.2748383, 0.0, 0.08 };
Point(461) = { 0.0188438, 1.280802, 0.0, 0.08 };
Circle(328) = { 459, 460, 461 };
Point(462) = { 0.0672612, 1.27816, 0.0, 0.08 };
Line(329) = { 461, 462};
Point(463) = { 0.0689915, 1.2795097, 0.0, 0.08 };
Point(464) = { 0.0674515, 1.2797, 0.0, 0.08 };
Circle(330) = { 462, 464, 463 };
Point(465) = { 0.0676418, 1.28124, 0.0, 0.08 };
Circle(331) = { 463, 464, 465 };
Point(466) = { 0.0184142, 1.2870499, 0.0, 0.08 };
Line(332) = { 465, 466};
Point(467) = { 0.0135032, 1.2929503, 0.0, 0.08 };
Point(468) = { 0.0195032, 1.2929593, 0.0, 0.08 };
Circle(333) = { 466, 468, 467 };
Point(469) = { 0.0135032, 1.3023383, 0.0, 0.08 };
Line(334) = { 467, 469};
Point(470) = { 0.0145066, 1.30566, 0.0, 0.08 };
Point(471) = { 0.0195032, 1.3023383, 0.0, 0.08 };
Circle(335) = { 469, 471, 470 };
Point(472) = { 0.0200262, 1.3083155, 0.0, 0.08 };
Circle(336) = { 470, 471, 472 };
Point(473) = { 0.0532612, 1.30566, 0.0, 0.08 };
Line(337) = { 472, 473};
Point(474) = { 0.0549915, 1.3070097, 0.0, 0.08 };
Point(475) = { 0.0534515, 1.3072, 0.0, 0.08 };
Circle(338) = { 473, 475, 474 };
Point(476) = { 0.0536418, 1.30874, 0.0, 0.08 };
Circle(339) = { 474, 475, 476 };
Point(477) = { 0.0184142, 1.3129054, 0.0, 0.08 };
Line(340) = { 476, 477};
Point(478) = { 0.0135032, 1.3188057, 0.0, 0.08 };
Point(479) = { 0.0195032, 1.3188057, 0.0, 0.08 };
Circle(341) = { 477, 479, 478 };
Point(480) = { 0.0135032, 1.3298383, 0.0, 0.08 };
Line(342) = { 478, 480};
Point(481) = { 0.0195032, 1.3298383, 0.0, 0.08 };
Point(482) = { 0.0188438, 1.335802, 0.0, 0.08 };
Circle(343) = { 480, 481, 482 };
Point(483) = { 0.0672612, 1.33316, 0.0, 0.08 };
Line(344) = { 482, 483};
Point(484) = { 0.0689915, 1.3345097, 0.0, 0.08 };
Point(485) = { 0.0674515, 1.3347, 0.0, 0.08 };
Circle(345) = { 483, 485, 484 };
Point(486) = { 0.0676418, 1.33624, 0.0, 0.08 };
Circle(346) = { 484, 485, 486 };
Point(487) = { 0.0184142, 1.3420499, 0.0, 0.08 };
Line(347) = { 486, 487};
Point(488) = { 0.0135032, 1.3479503, 0.0, 0.08 };
Point(489) = { 0.0195032, 1.3479593, 0.0, 0.08 };
Circle(348) = { 487, 489, 488 };
Point(490) = { 0.0135032, 1.3573383, 0.0, 0.08 };
Line(349) = { 488, 490};
Point(491) = { 0.0145066, 1.36066, 0.0, 0.08 };
Point(492) = { 0.0195032, 1.3573383, 0.0, 0.08 };
Circle(350) = { 490, 492, 491 };
Point(493) = { 0.0200262, 1.3633155, 0.0, 0.08 };
Circle(351) = { 491, 492, 493 };
Point(494) = { 0.0532612, 1.36066, 0.0, 0.08 };
Line(352) = { 493, 494};
Point(495) = { 0.0549915, 1.3620097, 0.0, 0.08 };
Point(496) = { 0.0534515, 1.3622, 0.0, 0.08 };
Circle(353) = { 494, 496, 495 };
Point(497) = { 0.0536418, 1.36374, 0.0, 0.08 };
Circle(354) = { 495, 496, 497 };
Point(498) = { 0.0184142, 1.3679054, 0.0, 0.08 };
Line(355) = { 497, 498};
Point(499) = { 0.0135032, 1.3738057, 0.0, 0.08 };
Point(500) = { 0.0195032, 1.3738057, 0.0, 0.08 };
Circle(356) = { 498, 500, 499 };
Point(501) = { 0.0135032, 1.3848383, 0.0, 0.08 };
Line(357) = { 499, 501};
Point(502) = { 0.0195032, 1.3848383, 0.0, 0.08 };
Point(503) = { 0.0188438, 1.390802, 0.0, 0.08 };
Circle(358) = { 501, 502, 503 };
Point(504) = { 0.0672612, 1.38816, 0.0, 0.08 };
Line(359) = { 503, 504};
Point(505) = { 0.0689915, 1.3895097, 0.0, 0.08 };
Point(506) = { 0.0674515, 1.3897, 0.0, 0.08 };
Circle(360) = { 504, 506, 505 };
Point(507) = { 0.0676418, 1.39124, 0.0, 0.08 };
Circle(361) = { 505, 506, 507 };
Point(508) = { 0.0184142, 1.3970499, 0.0, 0.08 };
Line(362) = { 507, 508};
Point(509) = { 0.0135032, 1.4029503, 0.0, 0.08 };
Point(510) = { 0.0195032, 1.4029593, 0.0, 0.08 };
Circle(363) = { 508, 510, 509 };
Point(511) = { 0.0135032, 1.4123383, 0.0, 0.08 };
Line(364) = { 509, 511};
Point(512) = { 0.0145066, 1.41566, 0.0, 0.08 };
Point(513) = { 0.0195032, 1.4123383, 0.0, 0.08 };
Circle(365) = { 511, 513, 512 };
Point(514) = { 0.0200262, 1.4183155, 0.0, 0.08 };
Circle(366) = { 512, 513, 514 };
Point(515) = { 0.0532612, 1.41566, 0.0, 0.08 };
Line(367) = { 514, 515};
Point(516) = { 0.0549915, 1.4170097, 0.0, 0.08 };
Point(517) = { 0.0534515, 1.4172, 0.0, 0.08 };
Circle(368) = { 515, 517, 516 };
Point(518) = { 0.0536418, 1.41874, 0.0, 0.08 };
Circle(369) = { 516, 517, 518 };
Point(519) = { 0.0184142, 1.4229054, 0.0, 0.08 };
Line(370) = { 518, 519};
Point(520) = { 0.0135032, 1.4288057, 0.0, 0.08 };
Point(521) = { 0.0195032, 1.4288057, 0.0, 0.08 };
Circle(371) = { 519, 521, 520 };
Point(522) = { 0.0135032, 1.4398383, 0.0, 0.08 };
Line(372) = { 520, 522};
Point(523) = { 0.0195032, 1.4398383, 0.0, 0.08 };
Point(524) = { 0.0188438, 1.445802, 0.0, 0.08 };
Circle(373) = { 522, 523, 524 };
Point(525) = { 0.0672612, 1.44316, 0.0, 0.08 };
Line(374) = { 524, 525};
Point(526) = { 0.0689915, 1.4445097, 0.0, 0.08 };
Point(527) = { 0.0674515, 1.4447, 0.0, 0.08 };
Circle(375) = { 525, 527, 526 };
Point(528) = { 0.0676418, 1.44624, 0.0, 0.08 };

```

Circle(376) = { 526 , 527 , 528 } ;
 Point(529) = { 0.0184142 , 1.4520499 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(377) = { 528 , 529 } ;
 Point(530) = { 0.0135032 , 1.4579503 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(531) = { 0.0195032 , 1.4579593 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(378) = { 529 , 531 , 530 } ;
 Point(532) = { 0.0135032 , 1.4673383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(379) = { 530 , 532 } ;
 Point(533) = { 0.0145066 , 1.47066 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(534) = { 0.0195032 , 1.4673383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(380) = { 532 , 534 , 533 } ;
 Point(535) = { 0.0200262 , 1.4733155 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(381) = { 533 , 534 , 535 } ;
 Point(536) = { 0.0532612 , 1.47066 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(382) = { 535 , 536 } ;
 Point(537) = { 0.0549915 , 1.4720097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(538) = { 0.0534515 , 1.4722 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(383) = { 536 , 538 , 537 } ;
 Point(539) = { 0.0536418 , 1.47374 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(384) = { 537 , 538 , 539 } ;
 Point(540) = { 0.0184142 , 1.4779054 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(385) = { 539 , 540 } ;
 Point(541) = { 0.0135032 , 1.4838057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(542) = { 0.0195032 , 1.4838057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(386) = { 540 , 542 , 541 } ;
 Point(543) = { 0.0135032 , 1.4948383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(387) = { 541 , 543 } ;
 Point(544) = { 0.0195032 , 1.4948383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(545) = { 0.0188438 , 1.500802 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(388) = { 543 , 544 , 545 } ;
 Point(546) = { 0.0672612 , 1.49816 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(389) = { 545 , 546 } ;
 Point(547) = { 0.0689915 , 1.4995097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(548) = { 0.0674515 , 1.4997 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(390) = { 546 , 548 , 547 } ;
 Point(549) = { 0.0676418 , 1.50124 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(391) = { 547 , 548 , 549 } ;
 Point(550) = { 0.0184142 , 1.5070499 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(392) = { 549 , 550 } ;
 Point(551) = { 0.0135032 , 1.5129503 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(552) = { 0.0195032 , 1.5129593 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(393) = { 550 , 552 , 551 } ;
 Point(553) = { 0.0135032 , 1.5223383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(394) = { 551 , 553 } ;
 Point(554) = { 0.0145066 , 1.52566 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(555) = { 0.0195032 , 1.5223383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(395) = { 553 , 555 , 554 } ;
 Point(556) = { 0.0200262 , 1.5283155 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(396) = { 554 , 555 , 556 } ;
 Point(557) = { 0.0532612 , 1.52566 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(397) = { 556 , 557 } ;
 Point(558) = { 0.0549915 , 1.5270097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(559) = { 0.0534515 , 1.5272 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(398) = { 557 , 559 , 558 } ;
 Point(560) = { 0.0536418 , 1.52874 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(399) = { 558 , 559 , 560 } ;
 Point(561) = { 0.0184142 , 1.5329054 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(400) = { 560 , 561 } ;
 Point(562) = { 0.0135032 , 1.5388057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(563) = { 0.0195032 , 1.5388057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(401) = { 561 , 563 , 562 } ;
 Point(564) = { 0.0135032 , 1.5498383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(402) = { 562 , 564 } ;
 Point(565) = { 0.0195032 , 1.5498383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(566) = { 0.0188438 , 1.555802 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(403) = { 564 , 565 , 566 } ;
 Point(567) = { 0.0672612 , 1.55316 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(404) = { 566 , 567 } ;
 Point(568) = { 0.0689915 , 1.5545097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(569) = { 0.0674515 , 1.5547 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(405) = { 567 , 569 , 568 } ;
 Point(570) = { 0.0676418 , 1.55624 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(406) = { 568 , 569 , 570 } ;
 Point(571) = { 0.0184142 , 1.5620499 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(407) = { 570 , 571 } ;
 Point(572) = { 0.0135032 , 1.5679503 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(573) = { 0.0195032 , 1.5679593 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(408) = { 571 , 573 , 572 } ;
 Point(574) = { 0.0135032 , 1.5773383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(409) = { 572 , 574 } ;
 Point(575) = { 0.0145066 , 1.58066 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(576) = { 0.0195032 , 1.5773383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(410) = { 574 , 576 , 575 } ;
 Point(577) = { 0.0200262 , 1.5833155 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(411) = { 575 , 576 , 577 } ;
 Point(578) = { 0.0532612 , 1.58066 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(412) = { 577 , 578 } ;
 Point(579) = { 0.0549915 , 1.5820097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(580) = { 0.0534515 , 1.5822 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(413) = { 578 , 580 , 579 } ;
 Point(581) = { 0.0536418 , 1.58374 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(414) = { 579 , 580 , 581 } ;
 Point(582) = { 0.0184142 , 1.5879054 , 0.0 , 0.08 } ;

Line(415) = { 581 , 582 } ;
 Point(583) = { 0.0135032 , 1.5938057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(584) = { 0.0195032 , 1.5938057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(416) = { 582 , 584 , 583 } ;
 Point(585) = { 0.0135032 , 1.6048383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(417) = { 583 , 585 } ;
 Point(586) = { 0.0195032 , 1.6048383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(587) = { 0.0188438 , 1.610802 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(418) = { 585 , 586 , 587 } ;
 Point(588) = { 0.0672612 , 1.60816 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(419) = { 587 , 588 } ;
 Point(589) = { 0.0689915 , 1.6095097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(590) = { 0.0674515 , 1.6097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(420) = { 588 , 590 , 589 } ;
 Point(591) = { 0.0676418 , 1.61124 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(421) = { 589 , 590 , 591 } ;
 Point(592) = { 0.0184142 , 1.6170499 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(422) = { 591 , 592 } ;
 Point(593) = { 0.0135032 , 1.6229503 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(594) = { 0.0195032 , 1.6229593 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(423) = { 592 , 594 , 593 } ;
 Point(595) = { 0.0135032 , 1.6323383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(424) = { 593 , 595 } ;
 Point(596) = { 0.0145066 , 1.63566 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(597) = { 0.0195032 , 1.6323383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(425) = { 595 , 597 , 596 } ;
 Point(598) = { 0.0200262 , 1.6383155 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(426) = { 596 , 597 , 598 } ;
 Point(599) = { 0.0532612 , 1.63566 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(427) = { 598 , 599 } ;
 Point(600) = { 0.0549915 , 1.6370097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(601) = { 0.0534515 , 1.6372 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(428) = { 599 , 601 , 600 } ;
 Point(602) = { 0.0536418 , 1.63874 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(429) = { 600 , 601 , 602 } ;
 Point(603) = { 0.0184142 , 1.6429054 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(430) = { 602 , 603 } ;
 Point(604) = { 0.0135032 , 1.6488057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(605) = { 0.0195032 , 1.6488057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(431) = { 603 , 605 , 604 } ;
 Point(606) = { 0.0135032 , 1.6598383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(432) = { 604 , 606 } ;
 Point(607) = { 0.0195032 , 1.6598383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(608) = { 0.0188438 , 1.665802 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(433) = { 606 , 607 , 608 } ;
 Point(609) = { 0.0672612 , 1.66316 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(434) = { 608 , 609 } ;
 Point(610) = { 0.0689915 , 1.6645097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(611) = { 0.0674515 , 1.6647 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(435) = { 609 , 611 , 610 } ;
 Point(612) = { 0.0676418 , 1.66624 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(436) = { 610 , 611 , 612 } ;
 Point(613) = { 0.0184142 , 1.6720499 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(437) = { 612 , 613 } ;
 Point(614) = { 0.0135032 , 1.6779503 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(615) = { 0.0195032 , 1.6779593 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(438) = { 613 , 615 , 614 } ;
 Point(616) = { 0.0135032 , 1.6873383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(439) = { 614 , 616 } ;
 Point(617) = { 0.0145066 , 1.69066 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(618) = { 0.0195032 , 1.6873383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(440) = { 616 , 618 , 617 } ;
 Point(619) = { 0.0200262 , 1.6933155 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(441) = { 617 , 618 , 619 } ;
 Point(620) = { 0.0532612 , 1.69066 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(442) = { 619 , 620 } ;
 Point(621) = { 0.0549915 , 1.6920097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(622) = { 0.0534515 , 1.6922 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(443) = { 620 , 622 , 621 } ;
 Point(623) = { 0.0536418 , 1.69374 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(444) = { 621 , 622 , 623 } ;
 Point(624) = { 0.0184142 , 1.6979054 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(445) = { 623 , 624 } ;
 Point(625) = { 0.0135032 , 1.7038057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(626) = { 0.0195032 , 1.7038057 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(446) = { 624 , 626 , 625 } ;
 Point(627) = { 0.0135032 , 1.7148383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(447) = { 625 , 627 } ;
 Point(628) = { 0.0195032 , 1.7148383 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(629) = { 0.0188438 , 1.720802 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(448) = { 627 , 628 , 629 } ;
 Point(630) = { 0.0672612 , 1.71816 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(449) = { 629 , 630 } ;
 Point(631) = { 0.0689915 , 1.7195097 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(632) = { 0.0674515 , 1.7197 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(450) = { 630 , 632 , 631 } ;
 Point(633) = { 0.0676418 , 1.72124 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(451) = { 631 , 632 , 633 } ;
 Point(634) = { 0.0184142 , 1.7270499 , 0.0 , 0.08 } ;
 Line(452) = { 633 , 634 } ;
 Point(635) = { 0.0135032 , 1.7329503 , 0.0 , 0.08 } ;
 Point(636) = { 0.0195032 , 1.7329593 , 0.0 , 0.08 } ;
 Circle(453) = { 634 , 636 , 635 } ;

```

Point(637) = { 0.0135032, 1.7423383, 0.0, 0.08 };
Line(454) = { 635, 637};
Point(638) = { 0.0145066, 1.74566, 0.0, 0.08 };
Point(639) = { 0.0195032, 1.7423383, 0.0, 0.08 };
Circle(455) = { 637, 639, 638 };
Point(640) = { 0.0200262, 1.7483155, 0.0, 0.08 };
Circle(456) = { 638, 639, 640 };
Point(641) = { 0.0532612, 1.74566, 0.0, 0.08 };
Line(457) = { 640, 641};
Point(642) = { 0.0549915, 1.7470097, 0.0, 0.08 };
Point(643) = { 0.0534515, 1.7472, 0.0, 0.08 };
Circle(458) = { 641, 643, 642 };
Point(644) = { 0.0536418, 1.74874, 0.0, 0.08 };
Circle(459) = { 642, 643, 644 };
Point(645) = { 0.0184142, 1.7529054, 0.0, 0.08 };
Line(460) = { 644, 645};
Point(646) = { 0.0135032, 1.7588057, 0.0, 0.08 };
Point(647) = { 0.0195032, 1.7588057, 0.0, 0.08 };
Circle(461) = { 645, 647, 646 };
Point(648) = { 0.0135032, 1.7698383, 0.0, 0.08 };
Line(462) = { 646, 648};
Point(649) = { 0.0195032, 1.7698383, 0.0, 0.08 };
Point(650) = { 0.0188438, 1.775802, 0.0, 0.08 };
Circle(463) = { 648, 649, 650 };
Point(651) = { 0.0672612, 1.77316, 0.0, 0.08 };
Line(464) = { 650, 651};
Point(652) = { 0.0689915, 1.7745097, 0.0, 0.08 };
Point(653) = { 0.0674515, 1.7747, 0.0, 0.08 };
Circle(465) = { 651, 653, 652 };
Point(654) = { 0.0676418, 1.77624, 0.0, 0.08 };
Circle(466) = { 652, 653, 654 };
Point(655) = { 0.0184142, 1.7820499, 0.0, 0.08 };
Line(467) = { 654, 655};
Point(656) = { 0.0135032, 1.7879503, 0.0, 0.08 };
Point(657) = { 0.0195032, 1.7879593, 0.0, 0.08 };
Circle(468) = { 655, 657, 656 };
Point(658) = { 0.0135032, 1.7973383, 0.0, 0.08 };
Line(469) = { 656, 658};
Point(659) = { 0.0145066, 1.80066, 0.0, 0.08 };
Point(660) = { 0.0195032, 1.7973383, 0.0, 0.08 };
Circle(470) = { 658, 660, 659 };
Point(661) = { 0.0200262, 1.8033155, 0.0, 0.08 };
Circle(471) = { 659, 660, 661 };
Point(662) = { 0.0532612, 1.80066, 0.0, 0.08 };
Line(472) = { 661, 662};
Point(663) = { 0.0549915, 1.8020097, 0.0, 0.08 };
Point(664) = { 0.0534515, 1.8022, 0.0, 0.08 };
Circle(473) = { 662, 664, 663 };
Point(665) = { 0.0536418, 1.80374, 0.0, 0.08 };
Circle(474) = { 663, 664, 665 };
Point(666) = { 0.0184142, 1.8079054, 0.0, 0.08 };
Line(475) = { 665, 666};
Point(667) = { 0.0135032, 1.8138057, 0.0, 0.08 };
Point(668) = { 0.0195032, 1.8138057, 0.0, 0.08 };
Circle(476) = { 666, 668, 667 };
Point(669) = { 0.0135032, 1.8248383, 0.0, 0.08 };
Line(477) = { 667, 669};
Point(670) = { 0.0195032, 1.8248383, 0.0, 0.08 };
Point(671) = { 0.0188438, 1.830802, 0.0, 0.08 };
Circle(478) = { 669, 670, 671 };
Point(672) = { 0.0672612, 1.82816, 0.0, 0.08 };
Line(479) = { 671, 672};
Point(673) = { 0.0689915, 1.8295097, 0.0, 0.08 };
Point(674) = { 0.0674515, 1.8297, 0.0, 0.08 };
Circle(480) = { 672, 674, 673 };
Point(675) = { 0.0676418, 1.83124, 0.0, 0.08 };
Circle(481) = { 673, 674, 675 };
Point(676) = { 0.0184142, 1.8370499, 0.0, 0.08 };
Line(482) = { 675, 676};
Point(677) = { 0.0135032, 1.8429503, 0.0, 0.08 };
Point(678) = { 0.0195032, 1.8429593, 0.0, 0.08 };
Circle(483) = { 676, 678, 677 };
Point(679) = { 0.0135032, 1.8523383, 0.0, 0.08 };
Line(484) = { 677, 679};
Point(680) = { 0.0145066, 1.85566, 0.0, 0.08 };
Point(681) = { 0.0195032, 1.8523383, 0.0, 0.08 };
Circle(485) = { 679, 681, 680 };
Point(682) = { 0.0200262, 1.8583155, 0.0, 0.08 };
Circle(486) = { 680, 681, 682 };
Point(683) = { 0.0532612, 1.85566, 0.0, 0.08 };
Line(487) = { 682, 683};
Point(684) = { 0.0549915, 1.8570097, 0.0, 0.08 };
Point(685) = { 0.0534515, 1.8572, 0.0, 0.08 };
Circle(488) = { 683, 685, 684 };
Point(686) = { 0.0536418, 1.85874, 0.0, 0.08 };
Circle(489) = { 684, 685, 686 };
Point(687) = { 0.0184142, 1.8629054, 0.0, 0.08 };
Line(490) = { 686, 687};
Point(688) = { 0.0135032, 1.8688057, 0.0, 0.08 };
Point(689) = { 0.0195032, 1.8688057, 0.0, 0.08 };
Circle(491) = { 687, 689, 688 };
Point(690) = { 0.0135032, 1.8798383, 0.0, 0.08 };
Line(492) = { 688, 690};
Point(691) = { 0.0195032, 1.8798383, 0.0, 0.08 };
Point(692) = { 0.0188438, 1.885802, 0.0, 0.08 };
Circle(493) = { 690, 691, 692 };
Point(693) = { 0.0672612, 1.88316, 0.0, 0.08 };
Line(494) = { 692, 693};
Point(694) = { 0.0689915, 1.8845097, 0.0, 0.08 };
Point(695) = { 0.0674515, 1.8847, 0.0, 0.08 };
Circle(495) = { 693, 695, 694 };
Point(696) = { 0.0676418, 1.88624, 0.0, 0.08 };
Circle(496) = { 694, 695, 696 };
Point(697) = { 0.0184142, 1.8920499, 0.0, 0.08 };
Line(497) = { 696, 697};
Point(698) = { 0.0135032, 1.8979503, 0.0, 0.08 };
Point(699) = { 0.0195032, 1.8979593, 0.0, 0.08 };
Circle(498) = { 697, 699, 698 };
Point(700) = { 0.0135032, 1.9073383, 0.0, 0.08 };
Line(499) = { 698, 700};
Point(701) = { 0.0145066, 1.91066, 0.0, 0.08 };
Point(702) = { 0.0195032, 1.9073383, 0.0, 0.08 };
Circle(500) = { 700, 702, 701 };
Point(703) = { 0.0200262, 1.9133155, 0.0, 0.08 };
Circle(501) = { 701, 702, 703 };
Point(704) = { 0.0532612, 1.91066, 0.0, 0.08 };
Line(502) = { 703, 704};
Point(705) = { 0.0549915, 1.9120097, 0.0, 0.08 };
Point(706) = { 0.0534515, 1.9122, 0.0, 0.08 };
Circle(503) = { 704, 706, 705 };
Point(707) = { 0.0536418, 1.91374, 0.0, 0.08 };
Circle(504) = { 705, 706, 707 };
Point(708) = { 0.0184142, 1.9179054, 0.0, 0.08 };
Line(505) = { 707, 708};
Point(709) = { 0.0135032, 1.9238057, 0.0, 0.08 };
Point(710) = { 0.0195032, 1.9238057, 0.0, 0.08 };
Circle(506) = { 708, 710, 709 };
Point(711) = { 0.0135032, 1.9348383, 0.0, 0.08 };
Line(507) = { 709, 711};
Point(712) = { 0.0195032, 1.9348383, 0.0, 0.08 };
Point(713) = { 0.0188438, 1.940802, 0.0, 0.08 };
Circle(508) = { 711, 712, 713 };
Point(714) = { 0.0672612, 1.93816, 0.0, 0.08 };
Line(509) = { 713, 714};
Point(715) = { 0.0689915, 1.9395097, 0.0, 0.08 };
Point(716) = { 0.0674515, 1.9397, 0.0, 0.08 };
Circle(510) = { 714, 716, 715 };
Point(717) = { 0.0676418, 1.94124, 0.0, 0.08 };
Circle(511) = { 715, 716, 717 };
Point(718) = { 0.0184142, 1.9470499, 0.0, 0.08 };
Line(512) = { 717, 718};
Point(719) = { 0.0135032, 1.9529503, 0.0, 0.08 };
Point(720) = { 0.0195032, 1.9529593, 0.0, 0.08 };
Circle(513) = { 718, 720, 719 };
Point(721) = { 0.0135032, 1.9623383, 0.0, 0.08 };
Line(514) = { 719, 721};
Point(722) = { 0.0145066, 1.96566, 0.0, 0.08 };
Point(723) = { 0.0195032, 1.9623383, 0.0, 0.08 };
Circle(515) = { 721, 723, 722 };
Point(724) = { 0.0200262, 1.9683155, 0.0, 0.08 };
Circle(516) = { 722, 723, 724 };
Point(725) = { 0.0532612, 1.96566, 0.0, 0.08 };
Line(517) = { 724, 725};
Point(726) = { 0.0549915, 1.9670097, 0.0, 0.08 };
Point(727) = { 0.0534515, 1.9672, 0.0, 0.08 };
Circle(518) = { 725, 727, 726 };
Point(728) = { 0.0536418, 1.96874, 0.0, 0.08 };
Circle(519) = { 726, 727, 728 };
Point(729) = { 0.0184142, 1.9729054, 0.0, 0.08 };
Line(520) = { 728, 729};
Point(730) = { 0.0135032, 1.9788057, 0.0, 0.08 };
Point(731) = { 0.0195032, 1.9788057, 0.0, 0.08 };
Circle(521) = { 729, 731, 730 };
Point(732) = { 0.0135032, 1.9898383, 0.0, 0.08 };
Line(522) = { 730, 732};
Point(733) = { 0.0195032, 1.9898383, 0.0, 0.08 };
Point(734) = { 0.0188438, 1.995802, 0.0, 0.08 };
Circle(523) = { 732, 733, 734 };
Point(735) = { 0.0672612, 1.99316, 0.0, 0.08 };
Line(524) = { 734, 735};
Point(736) = { 0.0689915, 1.9945097, 0.0, 0.08 };
Point(737) = { 0.0674515, 1.9947, 0.0, 0.08 };
Circle(525) = { 735, 737, 736 };
Point(738) = { 0.0676418, 1.99624, 0.0, 0.08 };
Circle(526) = { 736, 737, 738 };
Point(739) = { 0.0184142, 2.0020499, 0.0, 0.08 };
Line(527) = { 738, 739};
Point(740) = { 0.0135032, 2.0079503, 0.0, 0.08 };
Point(741) = { 0.0195032, 2.0079593, 0.0, 0.08 };
Circle(528) = { 739, 741, 740 };
Point(742) = { 0.0135032, 2.0173383, 0.0, 0.08 };
Line(529) = { 740, 742};
Point(743) = { 0.0145066, 2.02066, 0.0, 0.08 };
Point(744) = { 0.0195032, 2.0173383, 0.0, 0.08 };
Circle(530) = { 742, 744, 743 };
Point(745) = { 0.0200262, 2.0233155, 0.0, 0.08 };

```

```

Circle(531) = { 743 , 744 , 745 };
Point(746) = { 0.0532612 , 2.02066 , 0.0 , 0.08 };
Line(532) = { 745 , 746};
Point(747) = { 0.0549915 , 2.0220097 , 0.0 , 0.08 };
Point(748) = { 0.0534515 , 2.0222 , 0.0 , 0.08 };
Circle(533) = { 746 , 748 , 747 };
Point(749) = { 0.0536418 , 2.02374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(534) = { 747 , 748 , 749 };
Point(750) = { 0.0184142 , 2.0279054 , 0.0 , 0.08 };
Line(535) = { 749 , 750};
Point(751) = { 0.0135032 , 2.0338057 , 0.0 , 0.08 };
Point(752) = { 0.0195032 , 2.0338057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(536) = { 750 , 752 , 751 };
Point(753) = { 0.0135032 , 2.0448383 , 0.0 , 0.08 };
Line(537) = { 751 , 753};
Point(754) = { 0.0195032 , 2.0448383 , 0.0 , 0.08 };
Point(755) = { 0.0188438 , 2.050802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(538) = { 753 , 754 , 755 };
Point(756) = { 0.0672612 , 2.04816 , 0.0 , 0.08 };
Line(539) = { 755 , 756};
Point(757) = { 0.0689915 , 2.0495097 , 0.0 , 0.08 };
Point(758) = { 0.0674515 , 2.0497 , 0.0 , 0.08 };
Circle(540) = { 756 , 758 , 757 };
Point(759) = { 0.0676418 , 2.05124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(541) = { 757 , 758 , 759 };
Point(760) = { 0.0184142 , 2.0570499 , 0.0 , 0.08 };
Line(542) = { 759 , 760};
Point(761) = { 0.0135032 , 2.0629503 , 0.0 , 0.08 };
Point(762) = { 0.0195032 , 2.0629593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(543) = { 760 , 762 , 761 };
Point(763) = { 0.0135032 , 2.0723383 , 0.0 , 0.08 };
Line(544) = { 761 , 763};
Point(764) = { 0.0145066 , 2.07566 , 0.0 , 0.08 };
Point(765) = { 0.0195032 , 2.0723383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(545) = { 763 , 765 , 764 };
Point(766) = { 0.0200262 , 2.0783155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(546) = { 764 , 765 , 766 };
Point(767) = { 0.0532612 , 2.07566 , 0.0 , 0.08 };
Line(547) = { 766 , 767};
Point(768) = { 0.0549915 , 2.0770097 , 0.0 , 0.08 };
Point(769) = { 0.0534515 , 2.0772 , 0.0 , 0.08 };
Circle(548) = { 767 , 769 , 768 };
Point(770) = { 0.0536418 , 2.07874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(549) = { 768 , 769 , 770 };
Point(771) = { 0.0184142 , 2.0829054 , 0.0 , 0.08 };
Line(550) = { 770 , 771};
Point(772) = { 0.0135032 , 2.0888057 , 0.0 , 0.08 };
Point(773) = { 0.0195032 , 2.0888057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(551) = { 771 , 773 , 772 };
Point(774) = { 0.0135032 , 2.0998383 , 0.0 , 0.08 };
Line(552) = { 772 , 774};
Point(775) = { 0.0195032 , 2.0998383 , 0.0 , 0.08 };
Point(776) = { 0.0188438 , 2.105802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(553) = { 774 , 775 , 776 };
Point(777) = { 0.0672612 , 2.10316 , 0.0 , 0.08 };
Line(554) = { 776 , 777};
Point(778) = { 0.0689915 , 2.1045097 , 0.0 , 0.08 };
Point(779) = { 0.0674515 , 2.1047 , 0.0 , 0.08 };
Circle(555) = { 777 , 779 , 778 };
Point(780) = { 0.0676418 , 2.10624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(556) = { 778 , 779 , 780 };
Point(781) = { 0.0184142 , 2.1120499 , 0.0 , 0.08 };
Line(557) = { 780 , 781};
Point(782) = { 0.0135032 , 2.1179503 , 0.0 , 0.08 };
Point(783) = { 0.0195032 , 2.1179593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(558) = { 781 , 783 , 782 };
Point(784) = { 0.0135032 , 2.1273383 , 0.0 , 0.08 };
Line(559) = { 782 , 784};
Point(785) = { 0.0145066 , 2.13066 , 0.0 , 0.08 };
Point(786) = { 0.0195032 , 2.1273383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(560) = { 784 , 786 , 785 };
Point(787) = { 0.0200262 , 2.1333155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(561) = { 785 , 786 , 787 };
Point(788) = { 0.0532612 , 2.13066 , 0.0 , 0.08 };
Line(562) = { 787 , 788};
Point(789) = { 0.0549915 , 2.1320097 , 0.0 , 0.08 };
Point(790) = { 0.0534515 , 2.1322 , 0.0 , 0.08 };
Circle(563) = { 788 , 790 , 789 };
Point(791) = { 0.0536418 , 2.13374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(564) = { 789 , 790 , 791 };
Point(792) = { 0.0184142 , 2.1379054 , 0.0 , 0.08 };
Line(565) = { 791 , 792};
Point(793) = { 0.0135032 , 2.1438057 , 0.0 , 0.08 };
Point(794) = { 0.0195032 , 2.1438057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(566) = { 792 , 794 , 793 };
Point(795) = { 0.0135032 , 2.1548383 , 0.0 , 0.08 };
Line(567) = { 793 , 795};
Point(796) = { 0.0195032 , 2.1548383 , 0.0 , 0.08 };
Point(797) = { 0.0188438 , 2.160802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(568) = { 795 , 796 , 797 };
Point(798) = { 0.0672612 , 2.15816 , 0.0 , 0.08 };
Line(569) = { 797 , 798};
Point(799) = { 0.0689915 , 2.1595097 , 0.0 , 0.08 };
Point(800) = { 0.0674515 , 2.1597 , 0.0 , 0.08 };
Circle(570) = { 798 , 800 , 799 };
Point(801) = { 0.0676418 , 2.16124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(571) = { 799 , 800 , 801 };
Point(802) = { 0.0184142 , 2.1670499 , 0.0 , 0.08 };
Line(572) = { 801 , 802};
Point(803) = { 0.0135032 , 2.1729503 , 0.0 , 0.08 };
Point(804) = { 0.0195032 , 2.1729593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(573) = { 802 , 804 , 803 };
Point(805) = { 0.0135032 , 2.1823383 , 0.0 , 0.08 };
Line(574) = { 803 , 805};
Point(806) = { 0.0145066 , 2.18566 , 0.0 , 0.08 };
Point(807) = { 0.0195032 , 2.1823383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(575) = { 805 , 807 , 806 };
Point(808) = { 0.0200262 , 2.1883155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(576) = { 806 , 807 , 808 };
Point(809) = { 0.0532612 , 2.18566 , 0.0 , 0.08 };
Line(577) = { 808 , 809};
Point(810) = { 0.0549915 , 2.1870097 , 0.0 , 0.08 };
Point(811) = { 0.0534515 , 2.1872 , 0.0 , 0.08 };
Circle(578) = { 809 , 811 , 810 };
Point(812) = { 0.0536418 , 2.18874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(579) = { 810 , 811 , 812 };
Point(813) = { 0.0184142 , 2.1929054 , 0.0 , 0.08 };
Line(580) = { 812 , 813};
Point(814) = { 0.0135032 , 2.1988057 , 0.0 , 0.08 };
Point(815) = { 0.0195032 , 2.1988057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(581) = { 813 , 815 , 814 };
Point(816) = { 0.0135032 , 2.2098383 , 0.0 , 0.08 };
Line(582) = { 814 , 816};
Point(817) = { 0.0195032 , 2.2098383 , 0.0 , 0.08 };
Point(818) = { 0.0188438 , 2.215802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(583) = { 816 , 817 , 818 };
Point(819) = { 0.0672612 , 2.21316 , 0.0 , 0.08 };
Line(584) = { 818 , 819};
Point(820) = { 0.0689915 , 2.2145097 , 0.0 , 0.08 };
Point(821) = { 0.0674515 , 2.2147 , 0.0 , 0.08 };
Circle(585) = { 819 , 821 , 820 };
Point(822) = { 0.0676418 , 2.21624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(586) = { 820 , 821 , 822 };
Point(823) = { 0.0184142 , 2.2220499 , 0.0 , 0.08 };
Line(587) = { 822 , 823};
Point(824) = { 0.0135032 , 2.2279503 , 0.0 , 0.08 };
Point(825) = { 0.0195032 , 2.2279593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(588) = { 823 , 825 , 824 };
Point(826) = { 0.0135032 , 2.2373383 , 0.0 , 0.08 };
Line(589) = { 824 , 826};
Point(827) = { 0.0145066 , 2.24066 , 0.0 , 0.08 };
Point(828) = { 0.0195032 , 2.2373383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(590) = { 826 , 828 , 827 };
Point(829) = { 0.0200262 , 2.2433155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(591) = { 827 , 828 , 829 };
Point(830) = { 0.0532612 , 2.24066 , 0.0 , 0.08 };
Line(592) = { 829 , 830};
Point(831) = { 0.0549915 , 2.2420097 , 0.0 , 0.08 };
Point(832) = { 0.0534515 , 2.2422 , 0.0 , 0.08 };
Circle(593) = { 830 , 832 , 831 };
Point(833) = { 0.0536418 , 2.24374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(594) = { 831 , 832 , 833 };
Point(834) = { 0.0184142 , 2.2479054 , 0.0 , 0.08 };
Line(595) = { 833 , 834};
Point(835) = { 0.0135032 , 2.2538057 , 0.0 , 0.08 };
Point(836) = { 0.0195032 , 2.2538057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(596) = { 834 , 836 , 835 };
Point(837) = { 0.0135032 , 2.2648383 , 0.0 , 0.08 };
Line(597) = { 835 , 837};
Point(838) = { 0.0195032 , 2.2648383 , 0.0 , 0.08 };
Point(839) = { 0.0188438 , 2.270802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(598) = { 837 , 838 , 839 };
Point(840) = { 0.0672612 , 2.26816 , 0.0 , 0.08 };
Line(599) = { 839 , 840};
Point(841) = { 0.0689915 , 2.2695097 , 0.0 , 0.08 };
Point(842) = { 0.0674515 , 2.2697 , 0.0 , 0.08 };
Circle(600) = { 840 , 842 , 841 };
Point(843) = { 0.0676418 , 2.27124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(601) = { 841 , 842 , 843 };
Point(844) = { 0.0184142 , 2.2770499 , 0.0 , 0.08 };
Line(602) = { 843 , 844};
Point(845) = { 0.0135032 , 2.2829503 , 0.0 , 0.08 };
Point(846) = { 0.0195032 , 2.2829593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(603) = { 844 , 846 , 845 };
Point(847) = { 0.0135032 , 2.2923383 , 0.0 , 0.08 };
Line(604) = { 845 , 847};
Point(848) = { 0.0145066 , 2.29566 , 0.0 , 0.08 };
Point(849) = { 0.0195032 , 2.2923383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(605) = { 847 , 849 , 848 };
Point(850) = { 0.0200262 , 2.2983155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(606) = { 848 , 849 , 850 };
Point(851) = { 0.0532612 , 2.29566 , 0.0 , 0.08 };
Line(607) = { 850 , 851};
Point(852) = { 0.0549915 , 2.2970097 , 0.0 , 0.08 };
Point(853) = { 0.0534515 , 2.2972 , 0.0 , 0.08 };
Circle(608) = { 851 , 853 , 852 };

```

```

Point(854) = { 0.0536418, 2.29874, 0.0, 0.08 };
Circle(609) = { 852, 853, 854 };
Point(855) = { 0.0184142, 2.3029054, 0.0, 0.08 };
Line(610) = { 854, 855};
Point(856) = { 0.0135032, 2.3088057, 0.0, 0.08 };
Point(857) = { 0.0195032, 2.3088057, 0.0, 0.08 };
Circle(611) = { 855, 857, 856 };
Point(858) = { 0.0135032, 2.3198383, 0.0, 0.08 };
Line(612) = { 856, 858};
Point(859) = { 0.0195032, 2.3198383, 0.0, 0.08 };
Point(860) = { 0.0188438, 2.325802, 0.0, 0.08 };
Circle(613) = { 858, 859, 860 };
Point(861) = { 0.0672612, 2.32316, 0.0, 0.08 };
Line(614) = { 860, 861};
Point(862) = { 0.0689915, 2.3245097, 0.0, 0.08 };
Point(863) = { 0.0674515, 2.3247, 0.0, 0.08 };
Circle(615) = { 861, 863, 862 };
Point(864) = { 0.0676418, 2.32624, 0.0, 0.08 };
Circle(616) = { 862, 863, 864 };
Point(865) = { 0.0184142, 2.3320499, 0.0, 0.08 };
Line(617) = { 864, 865};
Point(866) = { 0.0135032, 2.3379503, 0.0, 0.08 };
Point(867) = { 0.0195032, 2.3379593, 0.0, 0.08 };
Circle(618) = { 865, 867, 866 };
Point(868) = { 0.0135032, 2.3473383, 0.0, 0.08 };
Line(619) = { 866, 868};
Point(869) = { 0.0145066, 2.35066, 0.0, 0.08 };
Point(870) = { 0.0195032, 2.3473383, 0.0, 0.08 };
Circle(620) = { 868, 870, 869 };
Point(871) = { 0.0200262, 2.3533155, 0.0, 0.08 };
Circle(621) = { 869, 870, 871 };
Point(872) = { 0.0532612, 2.35066, 0.0, 0.08 };
Line(622) = { 871, 872};
Point(873) = { 0.0549915, 2.3520097, 0.0, 0.08 };
Point(874) = { 0.0534515, 2.3522, 0.0, 0.08 };
Circle(623) = { 872, 874, 873 };
Point(875) = { 0.0536418, 2.35374, 0.0, 0.08 };
Circle(624) = { 873, 874, 875 };
Point(876) = { 0.0184142, 2.3579054, 0.0, 0.08 };
Line(625) = { 875, 876};
Point(877) = { 0.0135032, 2.3638057, 0.0, 0.08 };
Point(878) = { 0.0195032, 2.3638057, 0.0, 0.08 };
Circle(626) = { 876, 878, 877 };
Point(879) = { 0.0135032, 2.3748383, 0.0, 0.08 };
Line(627) = { 877, 879};
Point(880) = { 0.0195032, 2.3748383, 0.0, 0.08 };
Point(881) = { 0.0188438, 2.380802, 0.0, 0.08 };
Circle(628) = { 879, 880, 881 };
Point(882) = { 0.0672612, 2.37816, 0.0, 0.08 };
Line(629) = { 881, 882};
Point(883) = { 0.0689915, 2.3795097, 0.0, 0.08 };
Point(884) = { 0.0674515, 2.3797, 0.0, 0.08 };
Circle(630) = { 882, 884, 883 };
Point(885) = { 0.0676418, 2.38124, 0.0, 0.08 };
Circle(631) = { 883, 884, 885 };
Point(886) = { 0.0184142, 2.3870499, 0.0, 0.08 };
Line(632) = { 885, 886};
Point(887) = { 0.0135032, 2.3929503, 0.0, 0.08 };
Point(888) = { 0.0195032, 2.3929593, 0.0, 0.08 };
Circle(633) = { 886, 888, 887 };
Point(889) = { 0.0135032, 2.4023383, 0.0, 0.08 };
Line(634) = { 887, 889};
Point(890) = { 0.0145066, 2.40566, 0.0, 0.08 };
Point(891) = { 0.0195032, 2.4023383, 0.0, 0.08 };
Circle(635) = { 889, 891, 890 };
Point(892) = { 0.0200262, 2.4083155, 0.0, 0.08 };
Circle(636) = { 890, 891, 892 };
Point(893) = { 0.0532612, 2.40566, 0.0, 0.08 };
Line(637) = { 892, 893};
Point(894) = { 0.0549915, 2.4070097, 0.0, 0.08 };
Point(895) = { 0.0534515, 2.4072, 0.0, 0.08 };
Circle(638) = { 893, 895, 894 };
Point(896) = { 0.0536418, 2.40874, 0.0, 0.08 };
Circle(639) = { 894, 895, 896 };
Point(897) = { 0.0184142, 2.4129054, 0.0, 0.08 };
Line(640) = { 896, 897};
Point(898) = { 0.0135032, 2.4188057, 0.0, 0.08 };
Point(899) = { 0.0195032, 2.4188057, 0.0, 0.08 };
Circle(641) = { 897, 899, 898 };
Point(900) = { 0.0135032, 2.4298383, 0.0, 0.08 };
Line(642) = { 898, 900};
Point(901) = { 0.0195032, 2.4298383, 0.0, 0.08 };
Point(902) = { 0.0188438, 2.435802, 0.0, 0.08 };
Circle(643) = { 900, 901, 902 };
Point(903) = { 0.0672612, 2.43316, 0.0, 0.08 };
Line(644) = { 902, 903};
Point(904) = { 0.0689915, 2.4345097, 0.0, 0.08 };
Point(905) = { 0.0674515, 2.4347, 0.0, 0.08 };
Circle(645) = { 903, 905, 904 };
Point(906) = { 0.0676418, 2.43624, 0.0, 0.08 };
Circle(646) = { 904, 905, 906 };
Point(907) = { 0.0184142, 2.4420499, 0.0, 0.08 };
Line(647) = { 906, 907};
Point(908) = { 0.0135032, 2.4479503, 0.0, 0.08 };
Point(909) = { 0.0195032, 2.4479593, 0.0, 0.08 };
Circle(648) = { 907, 909, 908 };
Point(910) = { 0.0135032, 2.4573383, 0.0, 0.08 };
Line(649) = { 908, 910};
Point(911) = { 0.0145066, 2.46066, 0.0, 0.08 };
Point(912) = { 0.0195032, 2.4573383, 0.0, 0.08 };
Circle(650) = { 910, 912, 911 };
Point(913) = { 0.0200262, 2.4633155, 0.0, 0.08 };
Circle(651) = { 911, 912, 913 };
Point(914) = { 0.0532612, 2.46066, 0.0, 0.08 };
Line(652) = { 913, 914};
Point(915) = { 0.0549915, 2.4620097, 0.0, 0.08 };
Point(916) = { 0.0534515, 2.4622, 0.0, 0.08 };
Circle(653) = { 914, 916, 915 };
Point(917) = { 0.0536418, 2.46374, 0.0, 0.08 };
Circle(654) = { 915, 916, 917 };
Point(918) = { 0.0184142, 2.4679054, 0.0, 0.08 };
Line(655) = { 917, 918};
Point(919) = { 0.0135032, 2.4738057, 0.0, 0.08 };
Point(920) = { 0.0195032, 2.4738057, 0.0, 0.08 };
Circle(656) = { 918, 920, 919 };
Point(921) = { 0.0135032, 2.4848383, 0.0, 0.08 };
Line(657) = { 919, 921};
Point(922) = { 0.0195032, 2.4848383, 0.0, 0.08 };
Point(923) = { 0.0188438, 2.490802, 0.0, 0.08 };
Circle(658) = { 921, 922, 923 };
Point(924) = { 0.0672612, 2.48816, 0.0, 0.08 };
Line(659) = { 923, 924};
Point(925) = { 0.0689915, 2.4895097, 0.0, 0.08 };
Point(926) = { 0.0674515, 2.4897, 0.0, 0.08 };
Circle(660) = { 924, 926, 925 };
Point(927) = { 0.0676418, 2.49124, 0.0, 0.08 };
Circle(661) = { 925, 926, 927 };
Point(928) = { 0.0184142, 2.4970499, 0.0, 0.08 };
Line(662) = { 927, 928};
Point(929) = { 0.0135032, 2.5029503, 0.0, 0.08 };
Point(930) = { 0.0195032, 2.5029593, 0.0, 0.08 };
Circle(663) = { 928, 930, 929 };
Point(931) = { 0.0135032, 2.5123383, 0.0, 0.08 };
Line(664) = { 929, 931};
Point(932) = { 0.0145066, 2.51566, 0.0, 0.08 };
Point(933) = { 0.0195032, 2.5123383, 0.0, 0.08 };
Circle(665) = { 931, 933, 932 };
Point(934) = { 0.0200262, 2.5183155, 0.0, 0.08 };
Circle(666) = { 932, 933, 934 };
Point(935) = { 0.0532612, 2.51566, 0.0, 0.08 };
Line(667) = { 934, 935};
Point(936) = { 0.0549915, 2.5170097, 0.0, 0.08 };
Point(937) = { 0.0534515, 2.5172, 0.0, 0.08 };
Circle(668) = { 935, 937, 936 };
Point(938) = { 0.0536418, 2.51874, 0.0, 0.08 };
Circle(669) = { 936, 937, 938 };
Point(939) = { 0.0184142, 2.5229054, 0.0, 0.08 };
Line(670) = { 938, 939};
Point(940) = { 0.0135032, 2.5288057, 0.0, 0.08 };
Point(941) = { 0.0195032, 2.5288057, 0.0, 0.08 };
Circle(671) = { 939, 941, 940 };
Point(942) = { 0.0135032, 2.5398383, 0.0, 0.08 };
Line(672) = { 940, 942};
Point(943) = { 0.0195032, 2.5398383, 0.0, 0.08 };
Point(944) = { 0.0188438, 2.545802, 0.0, 0.08 };
Circle(673) = { 942, 943, 944 };
Point(945) = { 0.0672612, 2.54316, 0.0, 0.08 };
Line(674) = { 944, 945};
Point(946) = { 0.0689915, 2.5445097, 0.0, 0.08 };
Point(947) = { 0.0674515, 2.5447, 0.0, 0.08 };
Circle(675) = { 945, 947, 946 };
Point(948) = { 0.0676418, 2.54624, 0.0, 0.08 };
Circle(676) = { 946, 947, 948 };
Point(949) = { 0.0184142, 2.5520499, 0.0, 0.08 };
Line(677) = { 948, 949};
Point(950) = { 0.0135032, 2.5579503, 0.0, 0.08 };
Point(951) = { 0.0195032, 2.5579593, 0.0, 0.08 };
Circle(678) = { 949, 951, 950 };
Point(952) = { 0.0135032, 2.5673383, 0.0, 0.08 };
Line(679) = { 950, 952};
Point(953) = { 0.0145066, 2.57066, 0.0, 0.08 };
Point(954) = { 0.0195032, 2.5673383, 0.0, 0.08 };
Circle(680) = { 952, 954, 953 };
Point(955) = { 0.0200262, 2.5733155, 0.0, 0.08 };
Circle(681) = { 953, 954, 955 };
Point(956) = { 0.0532612, 2.57066, 0.0, 0.08 };
Line(682) = { 955, 956};
Point(957) = { 0.0549915, 2.5720097, 0.0, 0.08 };
Point(958) = { 0.0534515, 2.5722, 0.0, 0.08 };
Circle(683) = { 956, 958, 957 };
Point(959) = { 0.0536418, 2.57374, 0.0, 0.08 };
Circle(684) = { 957, 958, 959 };
Point(960) = { 0.0184142, 2.5779054, 0.0, 0.08 };
Line(685) = { 959, 960};
Point(961) = { 0.0135032, 2.5838057, 0.0, 0.08 };
Point(962) = { 0.0195032, 2.5838057, 0.0, 0.08 };

```

```

Circle(686) = { 960 , 962 , 961 };
Point(963) = { 0.0135032 , 2.5948383 , 0.0 , 0.08 };
Line(687) = { 961 , 963};
Point(964) = { 0.0195032 , 2.5948383 , 0.0 , 0.08 };
Point(965) = { 0.0188438 , 2.600802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(688) = { 963 , 964 , 965 };
Point(966) = { 0.0672612 , 2.59816 , 0.0 , 0.08 };
Line(689) = { 965 , 966};
Point(967) = { 0.0689915 , 2.5995097 , 0.0 , 0.08 };
Point(968) = { 0.0674515 , 2.5997 , 0.0 , 0.08 };
Circle(690) = { 966 , 968 , 967 };
Point(969) = { 0.0676418 , 2.60124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(691) = { 967 , 968 , 969 };
Point(970) = { 0.0184142 , 2.6070499 , 0.0 , 0.08 };
Line(692) = { 969 , 970};
Point(971) = { 0.0135032 , 2.6129503 , 0.0 , 0.08 };
Point(972) = { 0.0195032 , 2.6129593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(693) = { 973 , 972 , 971 };
Point(973) = { 0.0135032 , 2.6223383 , 0.0 , 0.08 };
Line(694) = { 971 , 973};
Point(974) = { 0.0145066 , 2.62566 , 0.0 , 0.08 };
Point(975) = { 0.0195032 , 2.6223383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(695) = { 973 , 975 , 974 };
Point(976) = { 0.0200262 , 2.6283155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(696) = { 974 , 975 , 976 };
Point(977) = { 0.0532612 , 2.62566 , 0.0 , 0.08 };
Line(697) = { 976 , 977};
Point(978) = { 0.0549915 , 2.6270097 , 0.0 , 0.08 };
Point(979) = { 0.0534515 , 2.6272 , 0.0 , 0.08 };
Circle(698) = { 977 , 979 , 978 };
Point(980) = { 0.0536418 , 2.62874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(699) = { 978 , 979 , 980 };
Point(981) = { 0.0184142 , 2.6329054 , 0.0 , 0.08 };
Line(700) = { 980 , 981};
Point(982) = { 0.0135032 , 2.6388057 , 0.0 , 0.08 };
Point(983) = { 0.0195032 , 2.6388057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(701) = { 981 , 983 , 982 };
Point(984) = { 0.0135032 , 2.6498383 , 0.0 , 0.08 };
Line(702) = { 982 , 984};
Point(985) = { 0.0195032 , 2.6498383 , 0.0 , 0.08 };
Point(986) = { 0.0188438 , 2.655802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(703) = { 984 , 985 , 986 };
Point(987) = { 0.0672612 , 2.65316 , 0.0 , 0.08 };
Line(704) = { 986 , 987};
Point(988) = { 0.0689915 , 2.6545097 , 0.0 , 0.08 };
Point(989) = { 0.0674515 , 2.6547 , 0.0 , 0.08 };
Circle(705) = { 987 , 989 , 988 };
Point(990) = { 0.0676418 , 2.65624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(706) = { 988 , 989 , 990 };
Point(991) = { 0.0184142 , 2.6620499 , 0.0 , 0.08 };
Line(707) = { 990 , 991};
Point(992) = { 0.0135032 , 2.6679503 , 0.0 , 0.08 };
Point(993) = { 0.0195032 , 2.6679593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(708) = { 991 , 993 , 992 };
Point(994) = { 0.0135032 , 2.6773383 , 0.0 , 0.08 };
Line(709) = { 992 , 994};
Point(995) = { 0.0145066 , 2.68066 , 0.0 , 0.08 };
Point(996) = { 0.0195032 , 2.6773383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(710) = { 994 , 996 , 995 };
Point(997) = { 0.0200262 , 2.6833155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(711) = { 995 , 996 , 997 };
Point(998) = { 0.0532612 , 2.68066 , 0.0 , 0.08 };
Line(712) = { 997 , 998};
Point(999) = { 0.0549915 , 2.6820097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1000) = { 0.0534515 , 2.6822 , 0.0 , 0.08 };
Circle(713) = { 998 , 1000 , 999 };
Point(1001) = { 0.0536418 , 2.68374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(714) = { 999 , 1000 , 1001 };
Point(1002) = { 0.0184142 , 2.6879054 , 0.0 , 0.08 };
Line(715) = { 1001 , 1002};
Point(1003) = { 0.0135032 , 2.6938057 , 0.0 , 0.08 };
Point(1004) = { 0.0195032 , 2.6938057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(716) = { 1002 , 1004 , 1003 };
Point(1005) = { 0.0135032 , 2.7048383 , 0.0 , 0.08 };
Line(717) = { 1003 , 1005};
Point(1006) = { 0.0195032 , 2.7048383 , 0.0 , 0.08 };
Point(1007) = { 0.0188438 , 2.710802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(718) = { 1005 , 1006 , 1007 };
Point(1008) = { 0.0672612 , 2.70816 , 0.0 , 0.08 };
Line(719) = { 1007 , 1008};
Point(1009) = { 0.0689915 , 2.7095097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1010) = { 0.0674515 , 2.7097 , 0.0 , 0.08 };
Circle(720) = { 1008 , 1010 , 1009 };
Point(1011) = { 0.0676418 , 2.71124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(721) = { 1009 , 1010 , 1011 };
Point(1012) = { 0.0184142 , 2.7170499 , 0.0 , 0.08 };
Line(722) = { 1011 , 1012};
Point(1013) = { 0.0135032 , 2.7229503 , 0.0 , 0.08 };
Point(1014) = { 0.0195032 , 2.7229593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(723) = { 1012 , 1014 , 1013 };
Point(1015) = { 0.0135032 , 2.7323383 , 0.0 , 0.08 };
Line(724) = { 1013 , 1015};
Point(1016) = { 0.0145066 , 2.73566 , 0.0 , 0.08 };
Point(1017) = { 0.0195032 , 2.7323383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(725) = { 1015 , 1017 , 1016 };
Point(1018) = { 0.0200262 , 2.7383155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(726) = { 1016 , 1017 , 1018 };
Point(1019) = { 0.0532612 , 2.73566 , 0.0 , 0.08 };
Line(727) = { 1018 , 1019};
Point(1020) = { 0.0549915 , 2.7370097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1021) = { 0.0534515 , 2.7372 , 0.0 , 0.08 };
Circle(728) = { 1019 , 1021 , 1020 };
Point(1022) = { 0.0536418 , 2.73874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(729) = { 1020 , 1021 , 1022 };
Point(1023) = { 0.0184142 , 2.7429054 , 0.0 , 0.08 };
Line(730) = { 1022 , 1023};
Point(1024) = { 0.0135032 , 2.7488057 , 0.0 , 0.08 };
Point(1025) = { 0.0195032 , 2.7488057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(731) = { 1023 , 1025 , 1024 };
Point(1026) = { 0.0135032 , 2.7598383 , 0.0 , 0.08 };
Line(732) = { 1024 , 1026};
Point(1027) = { 0.0195032 , 2.7598383 , 0.0 , 0.08 };
Point(1028) = { 0.0188438 , 2.765802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(733) = { 1026 , 1027 , 1028 };
Point(1029) = { 0.0672612 , 2.76316 , 0.0 , 0.08 };
Line(734) = { 1028 , 1029};
Point(1030) = { 0.0689915 , 2.7645097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1031) = { 0.0674515 , 2.7647 , 0.0 , 0.08 };
Circle(735) = { 1029 , 1031 , 1030 };
Point(1032) = { 0.0676418 , 2.76624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(736) = { 1030 , 1031 , 1032 };
Point(1033) = { 0.0184142 , 2.7720499 , 0.0 , 0.08 };
Line(737) = { 1032 , 1033};
Point(1034) = { 0.0135032 , 2.7779503 , 0.0 , 0.08 };
Point(1035) = { 0.0195032 , 2.7779593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(738) = { 1033 , 1035 , 1034 };
Point(1036) = { 0.0135032 , 2.7873383 , 0.0 , 0.08 };
Line(739) = { 1034 , 1036};
Point(1037) = { 0.0145066 , 2.79066 , 0.0 , 0.08 };
Point(1038) = { 0.0195032 , 2.7873383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(740) = { 1036 , 1038 , 1037 };
Point(1039) = { 0.0200262 , 2.7933155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(741) = { 1037 , 1038 , 1039 };
Point(1040) = { 0.0532612 , 2.79066 , 0.0 , 0.08 };
Line(742) = { 1039 , 1040};
Point(1041) = { 0.0549915 , 2.7920097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1042) = { 0.0534515 , 2.7922 , 0.0 , 0.08 };
Circle(743) = { 1040 , 1042 , 1041 };
Point(1043) = { 0.0536418 , 2.79374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(744) = { 1041 , 1042 , 1043 };
Point(1044) = { 0.0184142 , 2.7979054 , 0.0 , 0.08 };
Line(745) = { 1043 , 1044};
Point(1045) = { 0.0135032 , 2.8038057 , 0.0 , 0.08 };
Point(1046) = { 0.0195032 , 2.8038057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(746) = { 1044 , 1046 , 1045 };
Point(1047) = { 0.0135032 , 2.8148383 , 0.0 , 0.08 };
Line(747) = { 1045 , 1047};
Point(1048) = { 0.0195032 , 2.8148383 , 0.0 , 0.08 };
Point(1049) = { 0.0188438 , 2.820802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(748) = { 1047 , 1048 , 1049 };
Point(1050) = { 0.0672612 , 2.81816 , 0.0 , 0.08 };
Line(749) = { 1049 , 1050};
Point(1051) = { 0.0689915 , 2.8195097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1052) = { 0.0674515 , 2.8197 , 0.0 , 0.08 };
Circle(750) = { 1050 , 1052 , 1051 };
Point(1053) = { 0.0676418 , 2.82124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(751) = { 1051 , 1052 , 1053 };
Point(1054) = { 0.0184142 , 2.8270499 , 0.0 , 0.08 };
Line(752) = { 1053 , 1054};
Point(1055) = { 0.0135032 , 2.8329503 , 0.0 , 0.08 };
Point(1056) = { 0.0195032 , 2.8329593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(753) = { 1054 , 1056 , 1055 };
Point(1057) = { 0.0135032 , 2.8423383 , 0.0 , 0.08 };
Line(754) = { 1055 , 1057};
Point(1058) = { 0.0145066 , 2.84566 , 0.0 , 0.08 };
Point(1059) = { 0.0195032 , 2.8423383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(755) = { 1057 , 1059 , 1058 };
Point(1060) = { 0.0200262 , 2.8483155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(756) = { 1058 , 1059 , 1060 };
Point(1061) = { 0.0532612 , 2.84566 , 0.0 , 0.08 };
Line(757) = { 1060 , 1061};
Point(1062) = { 0.0549915 , 2.8470097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1063) = { 0.0534515 , 2.8472 , 0.0 , 0.08 };
Circle(758) = { 1061 , 1063 , 1062 };
Point(1064) = { 0.0536418 , 2.84874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(759) = { 1062 , 1063 , 1064 };
Point(1065) = { 0.0184142 , 2.8529054 , 0.0 , 0.08 };
Line(760) = { 1064 , 1065};
Point(1066) = { 0.0135032 , 2.8588057 , 0.0 , 0.08 };
Point(1067) = { 0.0195032 , 2.8588057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(761) = { 1065 , 1067 , 1066 };
Point(1068) = { 0.0135032 , 2.8698383 , 0.0 , 0.08 };
Line(762) = { 1066 , 1068};
Point(1069) = { 0.0195032 , 2.8698383 , 0.0 , 0.08 };
Point(1070) = { 0.0188438 , 2.875802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(763) = { 1068 , 1069 , 1070 };

```

```

Point(1071) = { 0.0672612, 2.87316, 0.0, 0.08 };
Line(764) = { 1070, 1071};
Point(1072) = { 0.0689915, 2.8745097, 0.0, 0.08 };
Point(1073) = { 0.0674515, 2.8747, 0.0, 0.08 };
Circle(765) = { 1071, 1073, 1072 };
Point(1074) = { 0.0676418, 2.87624, 0.0, 0.08 };
Circle(766) = { 1072, 1073, 1074 };
Point(1075) = { 0.0184142, 2.8820499, 0.0, 0.08 };
Line(767) = { 1074, 1075};
Point(1076) = { 0.0135032, 2.8879503, 0.0, 0.08 };
Point(1077) = { 0.0195032, 2.8879593, 0.0, 0.08 };
Circle(768) = { 1075, 1077, 1076 };
Point(1078) = { 0.0135032, 2.8973383, 0.0, 0.08 };
Line(769) = { 1076, 1078};
Point(1079) = { 0.0145066, 2.90066, 0.0, 0.08 };
Point(1080) = { 0.0195032, 2.8973383, 0.0, 0.08 };
Circle(770) = { 1078, 1080, 1079 };
Point(1081) = { 0.0200262, 2.9033155, 0.0, 0.08 };
Circle(771) = { 1079, 1080, 1081 };
Point(1082) = { 0.0532612, 2.90066, 0.0, 0.08 };
Line(772) = { 1081, 1082};
Point(1083) = { 0.0549915, 2.9020097, 0.0, 0.08 };
Point(1084) = { 0.0534515, 2.9022, 0.0, 0.08 };
Circle(773) = { 1082, 1084, 1083 };
Point(1085) = { 0.0536418, 2.90374, 0.0, 0.08 };
Circle(774) = { 1083, 1084, 1085 };
Point(1086) = { 0.0184142, 2.9079054, 0.0, 0.08 };
Line(775) = { 1085, 1086};
Point(1087) = { 0.0135032, 2.9138057, 0.0, 0.08 };
Point(1088) = { 0.0195032, 2.9138057, 0.0, 0.08 };
Circle(776) = { 1086, 1088, 1087 };
Point(1089) = { 0.0135032, 2.9248383, 0.0, 0.08 };
Line(777) = { 1087, 1089};
Point(1090) = { 0.0195032, 2.9248383, 0.0, 0.08 };
Point(1091) = { 0.0188438, 2.930802, 0.0, 0.08 };
Circle(778) = { 1089, 1090, 1091 };
Point(1092) = { 0.0672612, 2.92816, 0.0, 0.08 };
Line(779) = { 1091, 1092};
Point(1093) = { 0.0689915, 2.9295097, 0.0, 0.08 };
Point(1094) = { 0.0674515, 2.9297, 0.0, 0.08 };
Circle(780) = { 1092, 1094, 1093 };
Point(1095) = { 0.0676418, 2.93124, 0.0, 0.08 };
Circle(781) = { 1093, 1094, 1095 };
Point(1096) = { 0.0184142, 2.9370499, 0.0, 0.08 };
Line(782) = { 1095, 1096};
Point(1097) = { 0.0135032, 2.9429503, 0.0, 0.08 };
Point(1098) = { 0.0195032, 2.9429593, 0.0, 0.08 };
Circle(783) = { 1096, 1098, 1097 };
Point(1099) = { 0.0135032, 2.9523383, 0.0, 0.08 };
Line(784) = { 1097, 1099};
Point(1100) = { 0.0145066, 2.95566, 0.0, 0.08 };
Point(1101) = { 0.0195032, 2.9523383, 0.0, 0.08 };
Circle(785) = { 1099, 1101, 1100 };
Point(1102) = { 0.0200262, 2.9583155, 0.0, 0.08 };
Circle(786) = { 1100, 1101, 1102 };
Point(1103) = { 0.0532612, 2.95566, 0.0, 0.08 };
Line(787) = { 1102, 1103};
Point(1104) = { 0.0549915, 2.9570097, 0.0, 0.08 };
Point(1105) = { 0.0534515, 2.9572, 0.0, 0.08 };
Circle(788) = { 1103, 1105, 1104 };
Point(1106) = { 0.0536418, 2.95874, 0.0, 0.08 };
Circle(789) = { 1104, 1105, 1106 };
Point(1107) = { 0.0184142, 2.9629054, 0.0, 0.08 };
Line(790) = { 1106, 1107};
Point(1108) = { 0.0135032, 2.9688057, 0.0, 0.08 };
Point(1109) = { 0.0195032, 2.9688057, 0.0, 0.08 };
Circle(791) = { 1107, 1109, 1108 };
Point(1110) = { 0.0135032, 2.9798383, 0.0, 0.08 };
Line(792) = { 1108, 1110};
Point(1111) = { 0.0195032, 2.9798383, 0.0, 0.08 };
Point(1112) = { 0.0188438, 2.985802, 0.0, 0.08 };
Circle(793) = { 1110, 1111, 1112 };
Point(1113) = { 0.0672612, 2.98316, 0.0, 0.08 };
Line(794) = { 1112, 1113};
Point(1114) = { 0.0689915, 2.9845097, 0.0, 0.08 };
Point(1115) = { 0.0674515, 2.9847, 0.0, 0.08 };
Circle(795) = { 1113, 1115, 1114 };
Point(1116) = { 0.0676418, 2.98624, 0.0, 0.08 };
Circle(796) = { 1114, 1115, 1116 };
Point(1117) = { 0.0184142, 2.9920499, 0.0, 0.08 };
Line(797) = { 1116, 1117};
Point(1118) = { 0.0135032, 2.9979503, 0.0, 0.08 };
Point(1119) = { 0.0195032, 2.9979593, 0.0, 0.08 };
Circle(798) = { 1117, 1119, 1118 };
Point(1120) = { 0.0135032, 3.0073383, 0.0, 0.08 };
Line(799) = { 1118, 1120};
Point(1121) = { 0.0145066, 3.01066, 0.0, 0.08 };
Point(1122) = { 0.0195032, 3.0073383, 0.0, 0.08 };
Circle(800) = { 1120, 1122, 1121 };
Point(1123) = { 0.0200262, 3.0133155, 0.0, 0.08 };
Circle(801) = { 1121, 1122, 1123 };
Point(1124) = { 0.0532612, 3.01066, 0.0, 0.08 };
Line(802) = { 1123, 1124};

```

```

Point(1125) = { 0.0549915, 3.0120097, 0.0, 0.08 };
Point(1126) = { 0.0534515, 3.0122, 0.0, 0.08 };
Circle(803) = { 1124, 1126, 1125 };
Point(1127) = { 0.0536418, 3.01374, 0.0, 0.08 };
Circle(804) = { 1125, 1126, 1127 };
Point(1128) = { 0.0184142, 3.0179054, 0.0, 0.08 };
Line(805) = { 1127, 1128};
Point(1129) = { 0.0135032, 3.0238057, 0.0, 0.08 };
Point(1130) = { 0.0195032, 3.0238057, 0.0, 0.08 };
Circle(806) = { 1128, 1130, 1129 };
Point(1131) = { 0.0135032, 3.0348383, 0.0, 0.08 };
Line(807) = { 1129, 1131};
Point(1132) = { 0.0195032, 3.0348383, 0.0, 0.08 };
Point(1133) = { 0.0188438, 3.040802, 0.0, 0.08 };
Circle(808) = { 1131, 1132, 1133 };
Point(1134) = { 0.0672612, 3.03816, 0.0, 0.08 };
Line(809) = { 1133, 1134};
Point(1135) = { 0.0689915, 3.0395097, 0.0, 0.08 };
Point(1136) = { 0.0674515, 3.0397, 0.0, 0.08 };
Circle(810) = { 1134, 1136, 1135 };
Point(1137) = { 0.0676418, 3.04124, 0.0, 0.08 };
Circle(811) = { 1135, 1136, 1137 };
Point(1138) = { 0.0184142, 3.0470499, 0.0, 0.08 };
Line(812) = { 1137, 1138};
Point(1139) = { 0.0135032, 3.0529503, 0.0, 0.08 };
Point(1140) = { 0.0195032, 3.0529593, 0.0, 0.08 };
Circle(813) = { 1138, 1140, 1139 };
Point(1141) = { 0.0135032, 3.0623383, 0.0, 0.08 };
Line(814) = { 1139, 1141};
Point(1142) = { 0.0145066, 3.06566, 0.0, 0.08 };
Point(1143) = { 0.0195032, 3.0623383, 0.0, 0.08 };
Circle(815) = { 1141, 1143, 1142 };
Point(1144) = { 0.0200262, 3.0683155, 0.0, 0.08 };
Circle(816) = { 1142, 1143, 1144 };
Point(1145) = { 0.0532612, 3.06566, 0.0, 0.08 };
Line(817) = { 1144, 1145};
Point(1146) = { 0.0549915, 3.0670097, 0.0, 0.08 };
Point(1147) = { 0.0534515, 3.0672, 0.0, 0.08 };
Circle(818) = { 1145, 1147, 1146 };
Point(1148) = { 0.0536418, 3.06874, 0.0, 0.08 };
Circle(819) = { 1146, 1147, 1148 };
Point(1149) = { 0.0184142, 3.0729054, 0.0, 0.08 };
Line(820) = { 1148, 1149};
Point(1150) = { 0.0135032, 3.0788057, 0.0, 0.08 };
Point(1151) = { 0.0195032, 3.0788057, 0.0, 0.08 };
Circle(821) = { 1149, 1151, 1150 };
Point(1152) = { 0.0135032, 3.0898383, 0.0, 0.08 };
Line(822) = { 1150, 1152};
Point(1153) = { 0.0195032, 3.0898383, 0.0, 0.08 };
Point(1154) = { 0.0188438, 3.095802, 0.0, 0.08 };
Circle(823) = { 1152, 1153, 1154 };
Point(1155) = { 0.0672612, 3.09316, 0.0, 0.08 };
Line(824) = { 1154, 1155};
Point(1156) = { 0.0689915, 3.0945097, 0.0, 0.08 };
Point(1157) = { 0.0674515, 3.0947, 0.0, 0.08 };
Circle(825) = { 1155, 1157, 1156 };
Point(1158) = { 0.0676418, 3.09624, 0.0, 0.08 };
Circle(826) = { 1156, 1157, 1158 };
Point(1159) = { 0.0184142, 3.1020499, 0.0, 0.08 };
Line(827) = { 1158, 1159};
Point(1160) = { 0.0135032, 3.1079503, 0.0, 0.08 };
Point(1161) = { 0.0195032, 3.1079593, 0.0, 0.08 };
Circle(828) = { 1159, 1161, 1160 };
Point(1162) = { 0.0135032, 3.1173383, 0.0, 0.08 };
Line(829) = { 1160, 1162};
Point(1163) = { 0.0145066, 3.12066, 0.0, 0.08 };
Point(1164) = { 0.0195032, 3.1173383, 0.0, 0.08 };
Circle(830) = { 1162, 1164, 1163 };
Point(1165) = { 0.0200262, 3.1233155, 0.0, 0.08 };
Circle(831) = { 1163, 1164, 1165 };
Point(1166) = { 0.0532612, 3.12066, 0.0, 0.08 };
Line(832) = { 1165, 1166};
Point(1167) = { 0.0549915, 3.1220097, 0.0, 0.08 };
Point(1168) = { 0.0534515, 3.1222, 0.0, 0.08 };
Circle(833) = { 1166, 1168, 1167 };
Point(1169) = { 0.0536418, 3.12374, 0.0, 0.08 };
Circle(834) = { 1167, 1168, 1169 };
Point(1170) = { 0.0184142, 3.1279054, 0.0, 0.08 };
Line(835) = { 1169, 1170};
Point(1171) = { 0.0135032, 3.1338057, 0.0, 0.08 };
Point(1172) = { 0.0195032, 3.1338057, 0.0, 0.08 };
Circle(836) = { 1170, 1172, 1171 };
Point(1173) = { 0.0135032, 3.1448383, 0.0, 0.08 };
Line(837) = { 1171, 1173};
Point(1174) = { 0.0195032, 3.1448383, 0.0, 0.08 };
Point(1175) = { 0.0188438, 3.150802, 0.0, 0.08 };
Circle(838) = { 1173, 1174, 1175 };
Point(1176) = { 0.0672612, 3.14816, 0.0, 0.08 };
Line(839) = { 1175, 1176};
Point(1177) = { 0.0689915, 3.1495097, 0.0, 0.08 };
Point(1178) = { 0.0674515, 3.1497, 0.0, 0.08 };
Circle(840) = { 1176, 1178, 1177 };
Point(1179) = { 0.0676418, 3.15124, 0.0, 0.08 };

```

```

Circle(841) = { 1177 , 1178 , 1179 };
Line(1180) = { 0.0184142 , 3.1570499 , 0.0 , 0.08 };
Point(842) = { 1179 , 1180 };
Point(1181) = { 0.0135032 , 3.1629503 , 0.0 , 0.08 };
Point(1182) = { 0.0195032 , 3.1629593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(843) = { 1180 , 1182 , 1181 };
Point(1183) = { 0.0135032 , 3.1723383 , 0.0 , 0.08 };
Line(844) = { 1181 , 1183 };
Point(1184) = { 0.0145066 , 3.17566 , 0.0 , 0.08 };
Point(1185) = { 0.0195032 , 3.1723383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(845) = { 1183 , 1185 , 1184 };
Point(1186) = { 0.0200262 , 3.1783155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(846) = { 1184 , 1185 , 1186 };
Point(1187) = { 0.0532612 , 3.17566 , 0.0 , 0.08 };
Line(847) = { 1186 , 1187 };
Point(1188) = { 0.0549915 , 3.1770097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1189) = { 0.0534515 , 3.1772 , 0.0 , 0.08 };
Circle(848) = { 1187 , 1189 , 1188 };
Point(1190) = { 0.0536418 , 3.17874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(849) = { 1188 , 1189 , 1190 };
Point(1191) = { 0.0184142 , 3.1829054 , 0.0 , 0.08 };
Line(850) = { 1190 , 1191 };
Point(1192) = { 0.0135032 , 3.1888057 , 0.0 , 0.08 };
Point(1193) = { 0.0195032 , 3.1888057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(851) = { 1191 , 1193 , 1192 };
Point(1194) = { 0.0135032 , 3.1998383 , 0.0 , 0.08 };
Line(852) = { 1192 , 1194 };
Point(1195) = { 0.0195032 , 3.1998383 , 0.0 , 0.08 };
Point(1196) = { 0.0188438 , 3.205802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(853) = { 1194 , 1195 , 1196 };
Point(1197) = { 0.0672612 , 3.20316 , 0.0 , 0.08 };
Line(854) = { 1196 , 1197 };
Point(1198) = { 0.0689915 , 3.2045097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1199) = { 0.0674515 , 3.2047 , 0.0 , 0.08 };
Circle(855) = { 1197 , 1199 , 1198 };
Point(1200) = { 0.0676418 , 3.20624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(856) = { 1198 , 1199 , 1200 };
Point(1201) = { 0.0184142 , 3.2120499 , 0.0 , 0.08 };
Line(857) = { 1200 , 1201 };
Point(1202) = { 0.0135032 , 3.2179503 , 0.0 , 0.08 };
Point(1203) = { 0.0195032 , 3.2179593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(858) = { 1201 , 1203 , 1202 };
Point(1204) = { 0.0135032 , 3.2273383 , 0.0 , 0.08 };
Line(859) = { 1202 , 1204 };
Point(1205) = { 0.0145066 , 3.23066 , 0.0 , 0.08 };
Point(1206) = { 0.0195032 , 3.2273383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(860) = { 1204 , 1206 , 1205 };
Point(1207) = { 0.0200262 , 3.2333155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(861) = { 1205 , 1206 , 1207 };
Point(1208) = { 0.0532612 , 3.23066 , 0.0 , 0.08 };
Line(862) = { 1207 , 1208 };
Point(1209) = { 0.0549915 , 3.2320097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1210) = { 0.0534515 , 3.2322 , 0.0 , 0.08 };
Circle(863) = { 1208 , 1210 , 1209 };
Point(1211) = { 0.0536418 , 3.23374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(864) = { 1209 , 1210 , 1211 };
Point(1212) = { 0.0184142 , 3.2379054 , 0.0 , 0.08 };
Line(865) = { 1211 , 1212 };
Point(1213) = { 0.0135032 , 3.2438057 , 0.0 , 0.08 };
Point(1214) = { 0.0195032 , 3.2438057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(866) = { 1212 , 1214 , 1213 };
Point(1215) = { 0.0135032 , 3.2548383 , 0.0 , 0.08 };
Line(867) = { 1213 , 1215 };
Point(1216) = { 0.0195032 , 3.2548383 , 0.0 , 0.08 };
Point(1217) = { 0.0188438 , 3.260802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(868) = { 1215 , 1216 , 1217 };
Point(1218) = { 0.0672612 , 3.25816 , 0.0 , 0.08 };
Line(869) = { 1217 , 1218 };
Point(1219) = { 0.0689915 , 3.2595097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1220) = { 0.0674515 , 3.2597 , 0.0 , 0.08 };
Circle(870) = { 1218 , 1220 , 1219 };
Point(1221) = { 0.0676418 , 3.26124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(871) = { 1219 , 1220 , 1221 };
Point(1222) = { 0.0184142 , 3.2670499 , 0.0 , 0.08 };
Line(872) = { 1221 , 1222 };
Point(1223) = { 0.0135032 , 3.2729503 , 0.0 , 0.08 };
Point(1224) = { 0.0195032 , 3.2729593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(873) = { 1222 , 1224 , 1223 };
Point(1225) = { 0.0135032 , 3.2823383 , 0.0 , 0.08 };
Line(874) = { 1223 , 1225 };
Point(1226) = { 0.0145066 , 3.28566 , 0.0 , 0.08 };
Point(1227) = { 0.0195032 , 3.2823383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(875) = { 1225 , 1227 , 1226 };
Point(1228) = { 0.0200262 , 3.2883155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(876) = { 1226 , 1227 , 1228 };
Point(1229) = { 0.0532612 , 3.28566 , 0.0 , 0.08 };
Line(877) = { 1228 , 1229 };
Point(1230) = { 0.0549915 , 3.2870097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1231) = { 0.0534515 , 3.2872 , 0.0 , 0.08 };
Circle(878) = { 1229 , 1231 , 1230 };
Point(1232) = { 0.0536418 , 3.28874 , 0.0 , 0.08 };
Circle(879) = { 1230 , 1231 , 1232 };
Point(1233) = { 0.0184142 , 3.2929054 , 0.0 , 0.08 };

Line(880) = { 1232 , 1233 };
Point(1234) = { 0.0135032 , 3.2988057 , 0.0 , 0.08 };
Point(1235) = { 0.0195032 , 3.2988057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(881) = { 1233 , 1235 , 1234 };
Point(1236) = { 0.0135032 , 3.3098383 , 0.0 , 0.08 };
Line(882) = { 1234 , 1236 };
Point(1237) = { 0.0195032 , 3.3098383 , 0.0 , 0.08 };
Point(1238) = { 0.0188438 , 3.315802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(883) = { 1236 , 1237 , 1238 };
Point(1239) = { 0.0672612 , 3.31316 , 0.0 , 0.08 };
Line(884) = { 1238 , 1239 };
Point(1240) = { 0.0689915 , 3.3145097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1241) = { 0.0674515 , 3.3147 , 0.0 , 0.08 };
Circle(885) = { 1239 , 1241 , 1240 };
Point(1242) = { 0.0676418 , 3.31624 , 0.0 , 0.08 };
Circle(886) = { 1240 , 1241 , 1242 };
Point(1243) = { 0.0184142 , 3.3220499 , 0.0 , 0.08 };
Line(887) = { 1242 , 1243 };
Point(1244) = { 0.0135032 , 3.3279503 , 0.0 , 0.08 };
Point(1245) = { 0.0195032 , 3.3279593 , 0.0 , 0.08 };
Circle(888) = { 1243 , 1245 , 1244 };
Point(1246) = { 0.0135032 , 3.3373383 , 0.0 , 0.08 };
Line(889) = { 1244 , 1246 };
Point(1247) = { 0.0145066 , 3.34066 , 0.0 , 0.08 };
Point(1248) = { 0.0195032 , 3.3373383 , 0.0 , 0.08 };
Circle(890) = { 1246 , 1248 , 1247 };
Point(1249) = { 0.0200262 , 3.3433155 , 0.0 , 0.08 };
Circle(891) = { 1247 , 1248 , 1249 };
Point(1250) = { 0.0532612 , 3.34066 , 0.0 , 0.08 };
Line(892) = { 1249 , 1250 };
Point(1251) = { 0.0549915 , 3.3420097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1252) = { 0.0534515 , 3.3422 , 0.0 , 0.08 };
Circle(893) = { 1250 , 1252 , 1251 };
Point(1253) = { 0.0536418 , 3.34374 , 0.0 , 0.08 };
Circle(894) = { 1251 , 1252 , 1253 };
Point(1254) = { 0.0184142 , 3.3479054 , 0.0 , 0.08 };
Line(895) = { 1253 , 1254 };
Point(1255) = { 0.0135032 , 3.3538057 , 0.0 , 0.08 };
Point(1256) = { 0.0195032 , 3.3538057 , 0.0 , 0.08 };
Circle(896) = { 1254 , 1256 , 1255 };
Point(1257) = { 0.0135032 , 3.3648383 , 0.0 , 0.08 };
Line(897) = { 1255 , 1257 };
Point(1258) = { 0.0145066 , 3.36816 , 0.0 , 0.08 };
Point(1259) = { 0.0195932 , 3.3648384 , 0.0 , 0.08 };
Circle(898) = { 1257 , 1259 , 1258 };
Point(1260) = { 0.0188438 , 3.370802 , 0.0 , 0.08 };
Circle(899) = { 1258 , 1259 , 1260 };
Point(1261) = { 0.0672612 , 3.36816 , 0.0 , 0.08 };
Line(900) = { 1260 , 1261 };
Point(1262) = { 0.0689915 , 3.3695097 , 0.0 , 0.08 };
Point(1263) = { 0.0672612 , 3.3697 , 0.0 , 0.08 };
Circle(901) = { 1261 , 1263 , 1262 };
Point(1264) = { 0.0676418 , 3.37124 , 0.0 , 0.08 };
Circle(902) = { 1262 , 1263 , 1264 };
Point(1265) = { 0.0184142 , 3.37705 , 0.0 , 0.08 };
Line(903) = { 1264 , 1265 };
Point(1266) = { 0.0135032 , 3.3829503 , 0.0 , 0.08 };
Point(1267) = { 0.0195032 , 3.3829503 , 0.0 , 0.08 };
Circle(904) = { 1265 , 1267 , 1266 };
Point(1268) = { 0.0135032 , 3.411243 , 0.0 , 0.08 };
Line(905) = { 1266 , 1268 };
Point(1269) = { 0.0150032 , 3.412743 , 0.0 , 0.08 };
Point(1270) = { 0.0150032 , 3.411243 , 0.0 , 0.08 };
Circle(906) = { 1268 , 1270 , 1269 };
Point(1271) = { 0.0190032 , 3.412743 , 0.0 , 0.08 };
Line(907) = { 1269 , 1271 };
Point(1272) = { 0.0205032 , 3.414243 , 0.0 , 0.08 };
Point(1273) = { 0.0190032 , 3.414243 , 0.0 , 0.08 };
Circle(908) = { 1271 , 1273 , 1272 };
Point(1274) = { 0.0205032 , 3.426243 , 0.0 , 0.08 };
Line(909) = { 1272 , 1274 };
Point(1275) = { 0.0190032 , 3.427743 , 0.0 , 0.08 };
Point(1276) = { 0.0190032 , 3.426243 , 0.0 , 0.08 };
Circle(910) = { 1274 , 1276 , 1275 };
Point(1277) = { 0.0170032 , 3.427743 , 0.0 , 0.08 };
Line(911) = { 1275 , 1277 };
Point(1278) = { 0.0160032 , 3.428743 , 0.0 , 0.08 };
Line(912) = { 1277 , 1278 };
Point(1279) = { 0.0160032 , 3.5027451 , 0.0 , 0.08 };
Line(913) = { 1279 , 1278 };
Point(1280) = { 0.0106699 , 3.5146708 , 0.0 , 0.08 };
Point(1281) = { 3.2E-6 , 3.5027451 , 0.0 , 0.08 };
Circle(914) = { 1279 , 1281 , 1280 };
Point(1282) = { 0.0090032 , 3.5183976 , 0.0 , 0.08 };
Point(1283) = { 0.0140032 , 3.5183976 , 0.0 , 0.08 };
Circle(915) = { 1280 , 1283 , 1282 };
Point(1284) = { 0.0090032 , 3.5207451 , 0.0 , 0.08 };
Line(916) = { 1282 , 1284 };
Point(1285) = { 0.0190032 , 3.5307451 , 0.0 , 0.08 };
Point(1286) = { 0.0190032 , 3.5207451 , 0.0 , 0.08 };
Circle(917) = { 1284 , 1286 , 1285 };
Point(1287) = { 0.0250032 , 3.5367451 , 0.0 , 0.08 };
Point(1288) = { 0.0190032 , 3.5367451 , 0.0 , 0.08 };

```



```

Circle(918) = { 1285 , 1288 , 1287 };
Point(1289) = { 0.0250032 , 3.5607451 , 0.0 , 0.08 };
Line(919) = { 1287 , 1289};
Point(1290) = { 0.0150032 , 3.5707451 , 0.0 , 0.08 };
Point(1291) = { 0.0150032 , 3.5607451 , 0.0 , 0.08 };
Circle(920) = { 1289 , 1291 , 1290 };
Point(1292) = { 0 , 3.5707451 , 0.0 , 0.08 };
Line(921) = { 1290 , 1292};
Point(1293) = { 0 , 3.4996931 , 0.0 , 0.08 };
Line(922) = { 1292 , 1293};
Point(1294) = { 0.0087532 , 3.4996931 , 0.0 , 0.08 };
Line(923) = { 1293 , 1294};
Point(1295) = { 0.0087532 , 3.4211931 , 0.0 , 0.08 };
Line(924) = { 1294 , 1295};
Point(1296) = { 0.0112532 , 3.4211931 , 0.0 , 0.08 };
Point(1297) = { 0.0112532 , 3.4186931 , 0.0 , 0.08 };
Circle(925) = { 1295 , 1296 , 1297 };
Point(1298) = { 0.0160032 , 3.4186931 , 0.0 , 0.08 };
Line(926) = { 1297 , 1298};
Point(1299) = { 0.0160032 , 3.4211931 , 0.0 , 0.08 };
Point(1300) = { 0.0185032 , 3.4211931 , 0.0 , 0.08 };
Circle(927) = { 1298 , 1299 , 1300 };
Point(1301) = { 0.0169407 , 3.4235107 , 0.0 , 0.08 };
Circle(928) = { 1300 , 1299 , 1301 };
Point(1302) = { 0.0175032 , 3.4249012 , 0.0 , 0.08 };
Point(1303) = { 0.0160032 , 3.4249012 , 0.0 , 0.08 };
Circle(929) = { 1301 , 1302 , 1303 };
Line(930) = { 1303 , 1278};
//Término do desenho concha
Line(931) = { 1293 , 24};
Line(932) = { 1295 , 26};
//Término do desenho do tarugo
Point(1304) = { 0.039991 , 0.0577 , 0.0 , 0.08 };
Line(933) = { 1304 , 14};
Point(1305) = { 0.039991 , 0.0607 , 0.0 , 0.08 };
Point(1306) = { 0.042991 , 0.0607 , 0.0 , 0.08 };
Circle(934) = { 1304 , 1305 , 1306 };
Point(1307) = { 0.042991 , 0.1087 , 0.0 , 0.08 };
Line(935) = { 1307 , 1306};
Point(1308) = { 0.039991 , 0.1087 , 0.0 , 0.08 };

Point(1309) = { 0.039991 , 0.1117 , 0.0 , 0.08 };
Circle(936) = { 1307 , 1308 , 1309 };
Line(937) = { 1309 , 15};
Point(1310) = { 0.137491 , 0.2497 , 0.0 , 0.08 };
Point(1311) = { 0.137491 , 0.2332 , 0.0 , 0.08 };
Point(1312) = { 0.153991 , 0.2332 , 0.0 , 0.08 };
Circle(938) = { 1310 , 1311 , 1312 };
Point(1313) = { 0.157191 , 0.23399 , 0.0 , 0.08 };
Point(1314) = { 0.156991 , 0.2307 , 0.0 , 0.08 };
Circle(939) = { 1312 , 1313 , 1314 };
Point(1315) = { 0.156991 , 0.23375 , 0.0 , 0.08 };
Point(1316) = { 0.159991 , 0.2332 , 0.0 , 0.08 };
Circle(940) = { 1314 , 1315 , 1316 };
Point(1317) = { 0.137491 , 0.2332 , 0.0 , 0.08 };
Point(1318) = { 0.137491 , 0.2557 , 0.0 , 0.08 };
Circle(941) = { 1316 , 1317 , 1318 };
Point(1319) = { 0.137491 , 0.2332 , 0.0 , 0.08 };
Point(1320) = { 0.114991 , 0.2332 , 0.0 , 0.08 };
Circle(942) = { 1318 , 1319 , 1320 };
Point(1321) = { 0.117991 , 0.23375 , 0.0 , 0.08 };
Point(1322) = { 0.117991 , 0.2307 , 0.0 , 0.08 };
Circle(943) = { 1320 , 1321 , 1322 };
Point(1323) = { 0.117991 , 0.233751 , 0.0 , 0.08 };
Point(1324) = { 0.120991 , 0.2332 , 0.0 , 0.08 };
Circle(944) = { 1322 , 1323 , 1324 };
Point(1325) = { 0.137491 , 0.2332 , 0.0 , 0.08 };
Circle(945) = { 1324 , 1325 , 1310 };
Line(946) = { 0 , 5};
Point(1326) = { 0 , -8.897685 , 0.0 , 0.08 };
Line(947) = { 5 , 1326};
Point(1327) = { 8.897685 , 0 , 0.0 , 0.08 };
Circle(948) = { 1326 , 0 , 1327 };
Point(1328) = { 0 , 8.897685 , 0.0 , 0.08 };
Circle(949) = { 1327 , 0 , 1328 };
Point(1329) = { 0 , -10.677222 , 0.0 , 0.08 };
Line(950) = { 1328 , 1329};
Point(1330) = { 10.677222 , 0 , 0.0 , 0.08 };
Circle(951) = { 1329 , 0 , 1330 };
Point(1331) = { 0 , 10.677222 , 0.0 , 0.08 };
Circle(952) = { 1330 , 0 , 1331 };
Line(953) = { 1331 , 1329};

```