

RUÍDO DE LINHAS ELÉCTRICAS DE MUITO ALTA TENSÃO: UM ESTUDO EXPERIMENTAL E PREVISIONAL

António Ferreira¹, Tiago Abreu¹, Dulce Churro¹, Margarida Estevens¹, J. L. Bento Coelho^{1,2}

¹Acusticontrol, Consultores em Engenharia Acústica e Controlo de Ruído, Lda, Lisboa, Portugal
(tozeferr@netcabo.pt, tiago@acusticontrol.com, dulce@acusticontrol.com, margarida@acusticontrol.com,
bcoelho@austicontrol.com)

²CAPS-DEEC, IST, TULisbon, Lisboa, Portugal
bcoelho@ist.utl.pt

Resumo

O presente artigo relata o estudo do ruído gerado por linhas de Muito Alta Tensão (MAT, acima dos 220 kV), que constou de um trabalho experimental exaustivo, em diferentes condições meteorológicas e da elaboração de um modelo de previsão. Foi efectuado um estudo fenomenológico do ruído audível em linhas MAT, nomeadamente, o ruído gerado pelas descargas parciais originadas pelo efeito de coroa, tendo sido avaliados e comparados parametricamente os vários modelos existentes. Outros mecanismos contribuintes para o ruído global foram também analisados. O desempenho dos modelos foi comparado com os dados resultantes das campanhas de medição in-situ. São apresentados os resultados e análise das campanhas de medição de linhas MAT da Rede Nacional de Transporte (RNT) geridas pela REN (Redes Energéticas Nacionais), sob diversas condições meteorológicas bem como o desempenho dos vários modelos em função dos resultados obtidos, passos que constituem a metodologia de aferição do modelo previsional final recomendado. É apresentado o modelo analítico para efeitos previsionais.

Palavras-chave: ruído de linhas MAT, efeito de coroa, modelos de previsão

Abstract

This paper presents the results of an exhaustive experimental study of acoustic noise from ac high voltage transmission lines (above 220 kV), carried out under different meteorological conditions, as well as the development of a prediction model. The generation of audible noise is mainly caused by partial discharges, called corona, at the surface of conductors or hardware. Many aspects of corona discharges are unknown. The calculation of the magnitude of the various corona phenomena, such as the level of audible noise, is made by using empirical or semi-empirical equations. Several models reported in the scarce literature on the subject were considered and tested. A model was developed which yielded results in good agreement with the experimental data collected near the REN high voltage transmission lines. The noise spectra, obtained from the collected experimental data in favourable and unfavourable conditions are also presented and discussed.

Keywords: High voltage transmission lines, corona, audible noise, noise prediction.

1 Introdução

Nos sistemas modernos de distribuição de energia eléctrica, os centros electroprodutores (centrais térmicas, hidroeléctricas, nucleares, eólicas ou solares) encontram-se localizados, em geral, a grandes distâncias dos centros de consumo dessa mesma energia. As linhas de transmissão aérea da energia eléctrica, a operarem com altas voltagens (superiores a 220 kV) e a corrente alternada, utilizam condutores expostos às condições atmosféricas. Estas alteram constantemente as condições e o estado dos condutores e causam grandes variações na intensidade do “efeito de coroa”. Este efeito é o principal responsável pelas emissões sonoras resultantes da operação de linhas MAT [1-2].

O ruído gerado pelas linhas MAT pode, em determinadas condições, favoráveis à geração de ondas sonoras, em tempo chuvoso ou húmido, atingir níveis sonoros relativamente elevados, constituindo perturbação para as populações que habitam na proximidade. A instalação de novas linhas requer, como tal, a realização de estudos de impacte ambiente. O ambiente sonoro na proximidade das linhas tem de ser monitorizado para a avaliação da sua potencial degradação e consequente exposição das populações ao ruído.

As características meteorológicas preponderantes na maior parte do território nacional correspondem a condições desfavoráveis à radiação sonora, pelo que poderão ocorrer problemas de compatibilização com os calendários das campanhas de monitorização de ruído, mesmo em período de Inverno. Por outro lado, não é prática corrente a realização de medições acústicas em condições de chuvas. Deste modo, a caracterização do ruído de linhas MAT em condições favoráveis torna-se difícil, em termos práticos. A informação disponível sobre o assunto, a nível internacional, é, também, extremamente escassa.

A séria lacuna de conhecimento sobre o ruído acústico gerado pelas linhas MAT, tanto a nível nacional como internacional, motivou a REN (Redes Energéticas Nacionais) a promover um estudo experimental e analítico no sentido de desenvolver um modelo comprovadamente fiável para ser utilizado em estudos sobre o ruído gerado pelas linhas.

2 Tipologias das linhas MAT em estudo

As linhas MAT da Rede Nacional de Transporte (RNT) são linhas aéreas formadas por condutores nus entrançados (multifilares), montados em apoios (estruturas metálicas treliçadas) por intermédio de peças isolantes eléctricas designadas por isoladores (cadeias de isoladores de campânula simples, em porcelana, vidro ou materiais compósitos). A transmissão de energia em linhas MAT de corrente alternada é, por várias razões, trifásica. Existem, assim, três condutores (um por cada fase), nos quais a corrente circula com uma defasagem sucessiva de 120° e à frequência da rede, a qual é de 50Hz. As linhas podem apresentar as fases dispostas horizontalmente (ditas em esteira) com um só circuito; ou podem apresentar as fases dispostas em vertical, com dois circuitos por linha.

Em linhas MAT pode existir mais do que um condutor por fase (feixe de condutores) de modo a aumentar a capacidade, em termos de corrente, e para diminuir as descargas produzidas pelo efeito de coroa. Como o efeito de coroa depende, entre outros factores, do campo eléctrico à superfície nos condutores, do diâmetro destes e da configuração da linha, este pode ser minimizado aumentando a superfície dos condutores, logo o diâmetro dos mesmos.

A tipologia dos apoios utilizados nas linhas MAT da RNT é composta, no essencial, por dois tipos de apoios. Os apoios do tipo CW (fases verticais, dois circuitos) são empregues quer em linhas com tensões de 220kV (caso da linha Santarém-Zêzere) quer em linhas com tensões superiores. Para as linhas de 400kV são empregues apoios do tipo QS (fases em esteira), semelhantes ao tipo YDR, como é caso das linhas Batalha-Pêgo, Pêgo-Rio Maior, Palmela-Fanhões e Alqueva-Ferreira do Alentejo.

A tabela seguinte resume as características geométricas típicas das linhas MAT consideradas, em termos do diâmetro d , altura h mínima (ao solo) e número N de subcondutores, bem como o valor máximo do campo eléctrico E à superfície dos condutores

Tabela 1 – Dados geométricos e eléctricos das linhas MAT consideradas (fonte: REN).

Linha	Tensão nominal (kV)	d (cm)	h min. (m)	N	Emáx. (kV/cm)
Batalha-Pêgo	400	3,18	16	2	16,50
Pêgo-Rio Maior	400	3,18	20	2	15,02
Palmela-Fanhões	400	3,18	11	2	15,14
Alqueva-F. Alentejo	400	2,96	17	2	16,50
Santarém-Zêzere	220	2,86	21	1	14,64

Note-se que os valores do campo eléctrico E se referem à fase que apresenta valor mais elevado, a qual será a principal responsável pela energia sonora gerada pela linha. A linha Santarém-Zêzere apresenta um circuito duplo, isto é, dois conjuntos de três fases dispostas verticalmente, cada uma com um só sub-condutor. Estes dados são importantes como parâmetros para o modelo de previsão do ruído. De facto, a amplitude da emissão sonora aumenta com o aumento do campo eléctrico à superfície, porque a amplitude e a frequência de ocorrência das descargas eléctricas (“*streamers*”) aumenta com a voltagem. A energia sonora aumenta, também, com o aumento do diâmetro do condutor, e isto para o mesmo valor do campo eléctrico à superfície do condutor. Neste caso, aumenta a área da fonte sonora e, logo, a sua eficiência de radiação [1-2].

3 Mecanismos de geração de ruído em linhas de muito alta tensão

3.1 Ruído audível gerado pelo efeito de coroa

As descargas parciais produzidas pelo efeito de coroa devem-se à ionização do ar na proximidade dos cabos condutores das linhas de MAT. Sob a influência do campo eléctrico aplicado, cria-se um processo descrito como “avalanche de electrões”, com o conseqüente surgir de vários tipos de descargas [1]. Estas descargas ordenam-se, por intensidade crescente do campo eléctrico à superfície dos condutores, em: “*Trichel streamers*”, “*Negative glow*”, “*Positive streamers*”. O campo sonoro gerado por estas descargas eléctricas parciais produzidas pelo efeito de coroa deve-se à variação temporal do calor (transferência de quantidade de calor) e à variação local da força (transferência de quantidade de movimento). Uma linha MAT pode ser considerada como uma fonte em linha, comportando-se como um transdutor electroacústico “puro”, radiando ondas sonoras geradas pela soma das contribuições das fontes individuais incoerentes (descargas parciais).

O factor que mais afecta o efeito de coroa e, por conseqüência, o ruído audível por este gerado, é o campo eléctrico E existente à superfície do condutor. Por um lado, as descargas parciais devem-se à ionização do ar que rodeia o condutor quando o gradiente do campo eléctrico E à superfície do condutor excede um determinado valor crítico (“*corona onset gradient*”). Por outro, este valor do campo eléctrico E é afectado pelo diâmetro e número dos condutores, pela sua distância ao solo e pela distância entre as fases ou condutores. Como regra geral, um aumento de 10% do valor do campo eléctrico E traduz-se num aumento de cerca de 5dB do ruído audível, em situação favorável [1].

A intensidade do efeito de coroa depende, assim, do campo eléctrico à superfície dos condutores e também do diâmetro e estado de conservação destes. Irregularidades na superfície dos condutores bem como a existência de gotas de água potenciam este efeito, pois o campo eléctrico local ultrapassa a

capacidade dielétrica do ar, quebrando o efeito de isolamento elétrico. Como tal, quer o efeito de coroa quer o ruído audível resultante é mais intenso em condições atmosféricas propícias à formação de gotas na superfície dos condutores (chuva, nevoeiros ou neblinas), situação considerada como “favorável” à emissão sonora. Os vários modos de descarga resultantes do efeito de coroa geram um ruído de “banda larga”, com a energia distribuída entre os 1kHz e os 20kHz, qualitativamente descrito como um crepitar.

O ruído audível gerado pelo efeito de coroa também pode ocorrer em situações de total ausência de condensação nos condutores. Este efeito de coroa, em condições ditas “desfavoráveis” (para a emissão sonora), é, principalmente, devido à acumulação de matéria inorgânica e orgânica nos condutores e peças isoladoras. Esta acumulação, segundo vários estudos [1], parece ser sazonal, aumentando no período do Verão e diminuindo no Inverno, provavelmente devido ao efeito de lavagem da chuva.

As descargas, principalmente do tipo “*Negative glow*”, criam também uma “nuvem” de iões em torno dos condutores, os quais transmitem calor por meio de colisões com as moléculas do gás (ar) circundante. Esta “nuvem” é modulada ao dobro da frequência da rede ($2f$, com $f = 50\text{Hz}$) e comporta-se como uma fonte oscilatória sonora de geometria cilíndrica. Este mecanismo, que não se encontra totalmente compreendido, é considerado como o responsável pela eventual existência de componentes tonais, à frequência de 100Hz (e respectivos harmónicos), no ruído emitido pelas linhas MAT. Segundo Maruvada [1], estas componentes tonais correlacionam-se com as perdas de potência eléctrica devido ao efeito de coroa. Estas perdas, por sua vez, correlacionam-se com a intensidade da chuva (em mm/h). As componentes tonais podem ou não co-existir com a componente ruidosa de banda larga, directamente originada pelas descargas [3]. À data, não existe uma explicação completamente satisfatória da variabilidade deste fenómeno.

3.2 Outras fontes de ruído audível em linhas MAT

Uma outra contribuição potencial para o ruído audível nas linhas de MAT advém do ruído aerodinâmico. Este tipo de ruído, gerado pela passagem de um fluido (ar) pelos condutores e pelas respectivas estruturas de suporte, é de natureza aeroacústica. O fluxo laminar, ao interagir com um cilindro, caso dos cabos condutores, cria, em determinadas condições, uma série de vórtices, dita “série de von Karman”. Cada vez que um vórtice é produzido, é gerada uma onda de pressão sonora. A frequência f da separação dos vórtices é dada pela relação de Strouhal

$$f = \frac{St \cdot V}{d} \quad (1)$$

em que V é a velocidade do fluxo (ms^{-1}), d é o diâmetro do cilindro e St é o número de Strouhal (adimensional). Foi descoberto que o número de Strouhal é constante, cerca de 0,2, para um grande número de velocidades do fluxo e de formas dos objectos presentes nesse mesmo fluxo. A frequência de criação dos vórtices é directamente proporcional à velocidade do fluxo (ou seja, neste caso da velocidade do vento) e inversamente proporcional ao diâmetro do cabo [4]. Surgem assim sons com características tonais, qualitativamente descritos como “assobios”.

A radiação do campo sonoro assim produzido tem as características de um dipolo, uma fonte sonora relativamente pouco eficiente e logo geradora de níveis baixos de pressão sonora. Estes podem ser calculados recorrendo a soluções numéricas de várias equações chave da aeroacústica, nomeadamente a equação de Curle e outras equações de analogia acústica (Lighthill, Ffowcs Williams) [4]. No entanto, o efeito só começa a ser detectável para velocidades do vento superiores a 10m/s (sustidas), com o sinal sonoro a apresentar frequências inferiores aos 100Hz, isto para os diâmetros dos condutores existentes nas actuais linhas MAT da REN. Como tal, não se justifica a consideração deste fenómeno no modelo de previsão do ruído audível em linhas MAT.

Quando a frequência f da separação dos vórtices iguala fn , (a frequência natural do condutor, a qual depende da massa linear, da tensão e do comprimento deste), ocorre o fenómeno de ressonância. A

amplitude da vibração é então controlada pelo factor de amortecimento ζ , pelo que se utilizam amortecedores nas linhas MAT. Estas vibrações, que também podem ser geradas pelas forças electrostáticas do efeito de coroa (forças repulsivas de Coulomb e forças reactivas devido ao vento iónico), ocorrem a frequências inferiores a 10 Hz [1]. Sendo assim, estas questões são mais do âmbito da fadiga estrutural das linhas MAT do que dos seus efeitos no ambiente sonoro.

4 Resultados experimentais

Procurou-se um conjunto de locais onde pudessem ser testadas, em diversas campanhas em condições de emissão sonora distintas, essencialmente determinadas pelas condições meteorológicas, metodologias experimentais e previsionais apropriadas. Estes locais cobriram as linhas de 220kV e de 400kV e garantiram (i) representatividade de situações práticas encontradas nos trabalhos de monitorização de ruído e (ii) emissão de ruído das linhas sem influência determinante de outras fontes sonoras relevantes. A aquisição de sinal sonoro foi efectuada com o recurso a um analisador em tempo real. Foram também registados ficheiros áudio durante várias medições em locais próximos das linhas MAT da RNT. Estes mesmos ficheiros permitiram, além de várias análises, uma identificação complementar, post facto, das fontes sonoras existentes no local durante o período de medição, mediante a audição dos mesmos.

4.1 Efeito de coroa em condições atmosféricas desfavoráveis e favoráveis

O efeito de coroa pode manifestar-se com bom tempo (condição desfavorável) ou com tempo propício à condensação de gotas de água nos condutores (tais como chuva, nevoeiros ou neblinas) (condição favorável). Estas últimas condições são consideradas as mais conducentes à geração sonora pelo efeito de coroa.

Na Figura 1 são apresentadas as análises espectrais dos sinais sonoros registados em medições acústicas efectuadas no mesmo local, linha Batalha-Pêgo, poste 119-118, sob o eixo da linha, em condições de tempo chuvoso e com o efeito de coroa audível e intenso (1). São também apresentadas as análises espectrais dos sinais de medições efectuadas no mesmo local, em condições de bom tempo e com o efeito de coroa audível (2). Como comparação, é apresentado o espectro do ruído ambiente (3), sem qualquer efeito da linha ou influência de fontes mecânicas. Cada um dos resultados corresponde a valores médios de mais do que um registo experimental.

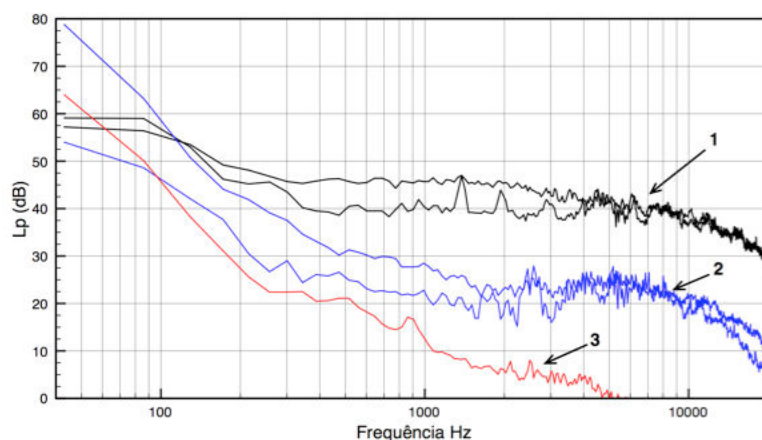


Figura 1 – Espectros do ruído audível: (1) com chuva; (2) sem chuva; (3) ambiente.

A influência do ruído gerado pelo efeito de coroa é bem visível nas bandas superiores a 1kHz. Os níveis energéticos nas frequências inferiores a 500Hz devem-se, principalmente, a efeitos do vento e outras fontes. Uma análise da representação do sinal no tempo, no caso do efeito de coroa em condição desfavorável, evidencia um conjunto de descargas eléctricas (“*streamers*”) que se repete num padrão repetitivo a cada 20ms, ou seja, aos 50Hz da frequência da rede. No caso do efeito de coroa em condição de precipitação (favorável), não são observados padrões rítmicos.

Adicionalmente ao tipo de sinal de “banda larga”, o ruído audível gerado pelo efeito de coroa pode apresentar componentes tonais, ou seja, com energia em frequências bem definidas. Estas podem ou não estar presentes (ou serem audíveis) em simultâneo com o ruído audível de “banda larga” anteriormente descrito. Tal como se pode observar na Figura 1, estas não são evidentes ou audíveis nas análises anteriores. Estas emissões foram, no entanto, registadas em medições efectuadas na linha Pêgo-Rio Maior de 400 kV, na zona do poste 84. A altura da fase é de cerca de 20 metros. As medições, cujo espectro se apresenta na Figura 2, foram efectuadas sob chuva persistente. Também é apresentado um espectro do ruído ambiente (natural), sem qualquer efeito da linha ou influência de fontes mecânicas.

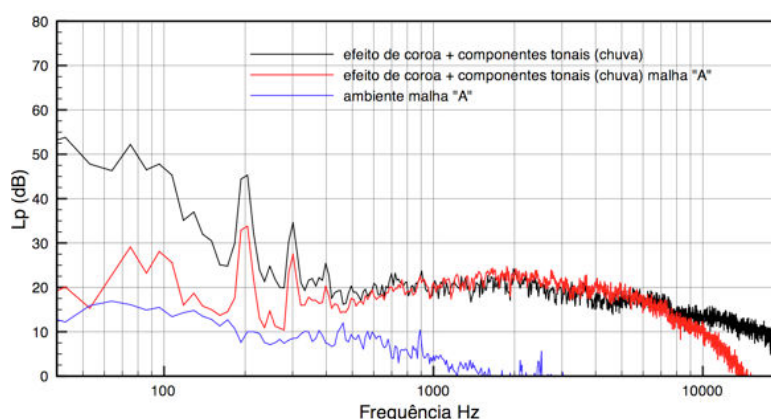


Figura 2 – Espectro do ruído audível gerado pelo efeito de coroa, com componentes tonais.

Aqui, são notórias as componentes harmónicas (200 e 300Hz) bem como a componente de 100Hz, sendo o espectro também apresentado numa versão filtrada pela malha “A”, de modo a evidenciar este facto. Estas componentes são bem audíveis, em conjunto com o ruído de banda larga gerado pelo efeito de coroa. Pode observar-se que o ruído gerado pelo efeito de coroa, com as suas características de “banda-larga”, apresenta bastante energia na gama de frequências de 2–4kHz, após filtragem pela malha “A”. Esta é uma zona em que o ser humano é particularmente sensível aos estímulos sonoros. Isto está de acordo com estudos psico-acústicos [5], os quais parecem indicar que as componentes de alta frequência, ou seja, o ruído de banda larga gerado pelo efeito de coroa, são mais incómodas do que as componentes tonais de baixa frequência.

4.2 Apreciações conclusivas

A intensidade do efeito de coroa é muito influenciada pelas condições atmosféricas. Os níveis de pressão sonora devidos ao efeito de coroa registados podem, assim, variar de mais de dois graus de magnitude [1]. Como as variações das perturbações atmosféricas são notoriamente imprevisíveis, a sua influência na intensidade do efeito de coroa só pode ser descrita em termos probabilísticos. Por outro lado, o ruído audível gerado pelo efeito de coroa é máximo durante as situações conducentes à condensação de gotas nos condutores. Após o término dessas condições, o efeito de coroa decai rapidamente. Tal efeito foi registado numa medição efectuada na linha Pêgo-Rio Maior (com

componentes tonais). Após 10 minutos da cessação de precipitação, os níveis de pressão sonora decaíram em cerca de 4 a 5dB.

Como conclusão, é apresentada na Figura 3, a gama dos níveis sonoros medidos em termos do indicador L_{Aeq} , para o conjunto das diferentes campanhas de medição acústica. Faz-se notar que o ruído devido ao efeito de coroa, em situação de bom tempo (desfavorável), apenas foi detectado na linhas Batalha-Pêgo, Pêgo-Rio Maior, Palmela-Fanhões e Alqueva-Ferreira do Alentejo, com tensão nominal equivalente, 400kV. Na linha Santarém-Zêzere, de 220kV, não foram detectadas emissões sonoras sem precipitação nem foi possível medir o efeito de coroa com precipitação.

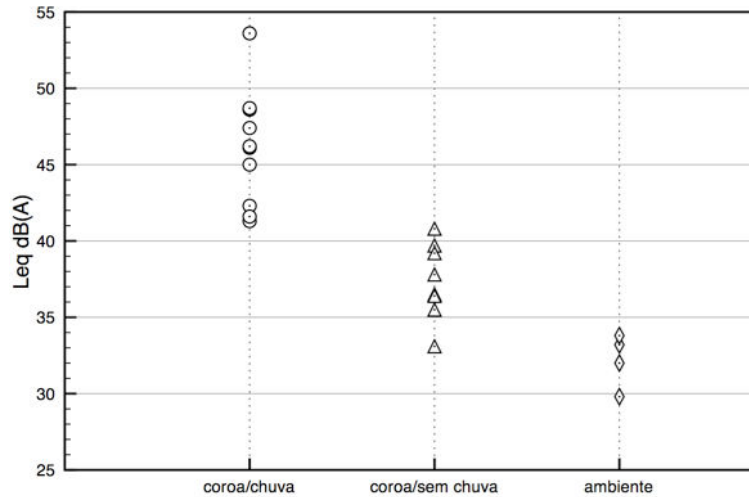


Figura 3 – Resultados das campanhas de medições nas linhas MAT.

5 O modelo de emissão REN/ACC

Foi construído o modelo REN/ACC para o nível sonoro do ruído emitido pelas linhas, que tem como base o modelo BPA, originalmente desenvolvido para a *Bonneville Power Association* [6]. Aquele prevê os níveis para a situação com precipitação (favorável), ou seja, em que o efeito de coroa é maximizado. O modelo foi concebido para uma gama de valores para o campo eléctrico E à superfície dos condutores entre os 13 e os 24kV/cm, e para um número variável de subcondutores em cada fase. Estes valores cobrem as variações e geometrias das linhas MAT da RNT.

O modelo de emissão REN/ACC foi desenvolvido com base na avaliação paramétrica dos modelos existentes na literatura bem como no cruzamento com os valores resultantes das várias campanhas de medições nas linhas MAT da RNT, em condições favoráveis (com precipitação), para validação.

5.1 Selecção do modelo de emissão de base

De modo a se poder estimar o nível de pressão sonora a uma determinada distância de uma fonte, convém caracterizar essa mesma fonte. As linhas MAT podem ser consideradas como fontes em linha. As fontes monopolares, geradas pelas descargas eléctricas do efeito de coroa, distribuem-se ao longo de todo o condutor. Importa, assim, calcular os níveis de potência sonora L_w gerados por este tipo de fonte. Considerando-se um condutor ou fase com um comprimento l_t total, as várias fontes podem ser integradas para se obter a intensidade sonora total I_r , a uma distância radial r

$$I_r = W \cdot \int_{l_t} \frac{1}{4\pi r^2} dx \quad (2)$$

A intensidade sonora I é aproximadamente igual, em campo distante, à pressão sonora (para uma onda plana). Ao estimar-se a potência sonora W , então obtém-se a pressão sonora p , para uma dada distância r . Para uma fonte em linha de comprimento l , cuja geometria de radiação sonora pode ser considerada cilíndrica, obtém-se [6]

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log_{10}(r) + 10 \cdot \log_{10}\left(\tan^{-1} \cdot \frac{l}{2r}\right) - 7,8 \quad (3)$$

considerando uma fonte em linha “infinita”, em que $l/2r \rightarrow \infty$ (por ex. linha MAT), obtém-se

$$L_p = L_w - k \cdot \log_{10}(r) - 5,8 \quad (4)$$

O coeficiente k pode variar entre 10 e 13,3, conforme várias medições [6]. Foi proposto o valor $k = 11,4$ de modo a ter também em conta a atenuação devido à absorção atmosférica [6]. O cálculo do nível da potência sonora L_w é sempre efectuado por meios indirectos. No caso do ruído gerado pelo efeito de coroa, a potência sonora de cada fase é inferida a partir de medições do nível de pressão sonora, efectuadas a determinada distância da linha eléctrica [6].

Vários estudos [1-2,6], em vários tipos de linhas, permitiram identificar os principais factores que afectam a potência sonora, e logo o nível de pressão sonora, gerado por um condutor sob o efeito de coroa. Os principais factores são, por ordem decrescente de importância: o campo eléctrico E_i à superfície do condutor ou fase i e o diâmetro do condutor d_i (cm ou mm). Existem termos de correcção para o caso de o número de sub-condutores num feixe ser superior a 2. A fórmula geral para o nível de potência sonora, para uma fase i , têm então a seguinte forma

$$L_{wi} = k_0 + k_1 \cdot \log(E_i) + k_2 \cdot \log(N_i) + k_3 \cdot \log(d_i) + \frac{q}{300} \quad (5)$$

em que os valores da constante k_0 e dos coeficientes k_1 , k_2 e k_3 são determinados a partir de dados experimentais [6]. O parâmetro q (em metros) é um factor de correcção para a altitude, pois as descargas parciais que originam o efeito de coroa dependem da densidade do ar, como se pode observar pela fórmula de Peek [1]. O parâmetro N_i representa o número de sub-condutores da fase i . No caso das linhas MAT da RNT, só serão consideradas as fórmulas construídas para um número de sub-condutores por fase ≤ 2 .

Do conjunto de fórmulas de previsão existentes, foram avaliadas três, as quais são designadas pela seguinte nomenclatura: BPA [6], GA1PL50 [7] e GP1PL50 [7]. Estas últimas resultam da aplicação de algoritmos genéticos (GA1PL50) e de uma outra forma de optimização relacionada, a programação genética (GP1PL50) a um vasto corpo de dados relativos ao ruído audível, em situação com precipitação, gerado por linhas MAT entre os 400-1300kV [7]. Foi, de seguida, efectuado um estudo paramétrico das várias fórmulas, calculando-se o perfil lateral do ruído emitido por uma linha com três fases, dispostas em esteira. Foram retirados valores da literatura [6] para o campo eléctrico à superfície dos condutores (17,10kV/cm), o diâmetro (40,7mm), a altura das fases (12,2m) para uma voltagem nominal de 525kV. Como apreciação adicional, foi também utilizada a fórmula GA3PL50, a qual calcula o valor global para três fases [7]. Os resultados são mostrados na Figura 4.

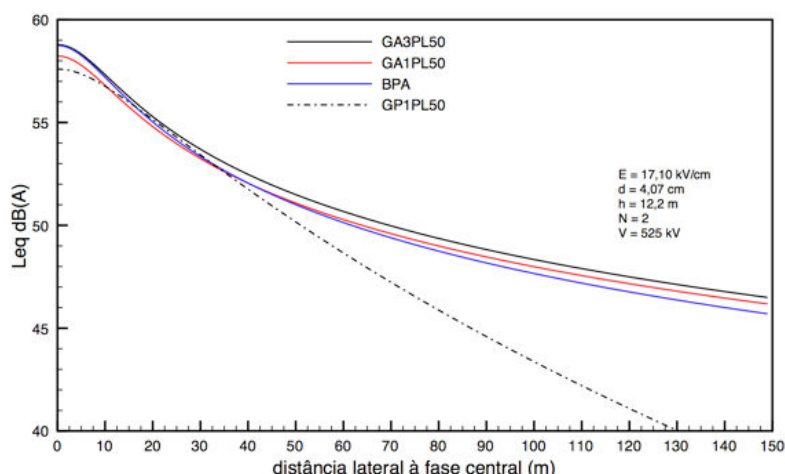


Figura 4 – Perfis laterais do nível sonoro calculados por vários modelos.

Tornou-se evidente que o modelo GP1PL50, após apresentar uma boa correlação com os outros modelos para distâncias entre os 15 e os 45 metros, decaiu de um modo que nada tem a haver com o decaimento esperado da pressão sonora, para este tipo de fonte. Uma possível explicação para tal facto reside na metodologia empregue pelos autores, para obter a fórmula GP1PL50. Como tal, a decisão incidu entre o modelo GA1PL50 e o modelo BPA. Para isso, foi comparado o desempenho destes modelos com os valores medidos do L_{Aeq} e que foram registados na linha Batalha-Pêgo e na linha Pêgo-Rio Maior (ambas de 400kV). Note-se que os modelos em causa calculam o índice estatístico L_{50} (para o caso de chuva estável). No entanto, para o tipo de sinal em consideração (estacionário no tempo, em termos de níveis sonoros) os valores do índice L_{50} (mediana) são praticamente idênticos (desvio padrão < 2dB) aos do índice energético L_{Aeq} (valor médio). A utilização deste último índice justifica-se, também, pela sua presença na legislação nacional actualmente em vigor.

Tabela 2 – Comparação do ruído audível medido e desempenho dos dois modelos de previsão, para duas linhas MAT. Situação de chuva persistente.

Linha (sob o eixo)	L_{Aeq} , medido dB(A)	BPA calc. dB(A)	Δ dB	GA1P calc. dB(A)	Δ dB
Batalha-Pêgo	53,3	50,3	3,0	49,1	4,2
Batalha-Pêgo	48,8	47,6	0,9	46,7	2,1
Batalha-Pêgo	48,7	47,6	0,8	46,7	2
Batalha-Pêgo	47,9	47,6	0,3	46,7	0,9
Pêgo-Rio Maior	41,2	41,0	0,2	39,9	1,3
Pêgo-Rio Maior	41,3	41,0	0,3	39,9	1,4

Em face dos resultados, foi adoptado o modelo BPA como “motor” de cálculo do modelo REN/ACC para previsão do ruído gerado pelas linhas MAT da RNT.

5.2 Modelo final

O modelo final de emissão REN/ACC tem duas componentes: uma que calcula, em condição favorável, o nível L_{Aeq} da linha MAT (L_F), para um determinado ponto receptor e de acordo com os valores do campo eléctrico E à superfície de cada condutor ou fase, o diâmetro deste e a geometria da linha MAT em questão; e uma outra componente que calcula, agora em condição desfavorável, o valor do nível L_{Aeq} da linha MAT (L_H), para um determinado ponto receptor e de acordo com os valores do campo eléctrico E à superfície de cada condutor ou fase, o diâmetro deste e a geometria da linha MAT

em questão. Esta última componente do cálculo da emissão sonora da linha MAT em situação desfavorável ou “homogénea” (L_H) foi introduzida de modo a permitir destrinçar a contribuição da linha (ruído particular) do ruído residual, visto que nas medições in-situ tal relação pode não ser de fácil quantificação. O modelo de emissão REN/ACC encontra-se ajustado para o conjunto de linhas que constituem a actual rede energética nacional para alta tensão [8].

É calculado o nível de emissão sonora $L_{Aeq,i}$ para cada fase i com base no campo eléctrico à superfície do condutor ou fase i (em kV/cm), no diâmetro do condutor ou fase i (em mm) e na distância radial (m) considerada, ao condutor ou fase i [8]. Os valores de $L_{Aeq,i}$ de cada fase i são de seguida adicionados energeticamente, obtendo-se o valor total

$$L_{Aeq,t} = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Aeq,i}}{10}} \right] \quad (7)$$

em que n é o número de fases (3 no caso das linhas de circuito simples da RNT). Para o caso das linhas MAT com circuitos duplos (220kV, apoios tipo CW), somam-se energeticamente as contribuições de cada grupo de três fases i e j .

O nível sonoro contínuo equivalente de longo termo, $L_{Aeq,LT}$, para o período de um ano, é obtido pesando as contribuições dos níveis calculados em situação favorável (L_F) com os níveis calculados em situação desfavorável ou “homogénea” (L_H). O peso das contribuições será dado pela probabilidade da ocorrência da situação favorável, ou seja de precipitação. Como se prevê que esta probabilidade seja diminuta, o nível sonoro contínuo equivalente de longo termo será principalmente determinado pelos níveis calculados em situação desfavorável ou “homogénea” (L_H).

5.3 Aferição e discussão dos resultados

O modelo foi aplicado aos dados de base da REN para dez locais considerados (linhas de 400kV e 220kV). Para cada local, foram efectuadas previsões do valor de L_{Aeq} sob a fase central ou eixo da linha. Foram considerados os respectivos diâmetros dos condutores, a geometria das linhas e os campos eléctricos E à superfície dos condutores para as várias tensões nominais. Segundo informação da REN, as linhas de 400 e 220kV podem ser operadas com voltagens nominais com variações de $\pm 5\%$, segundo as necessidades da rede. Esta variação origina distintos valores dos campos eléctricos à superfície dos condutores e logo variações na intensidade do efeito de coroa. De acordo com [6], este ajuste da voltagem das linhas MAT em operação pode-se traduzir em diferenças de cerca de 3dB na previsão do ruído gerado.

A Figura 5 apresenta a gama de resultados obtidos comparado com a gama dos valores medidos em condições favoráveis, estes só disponíveis para linhas de 400kV (tensão nominal).

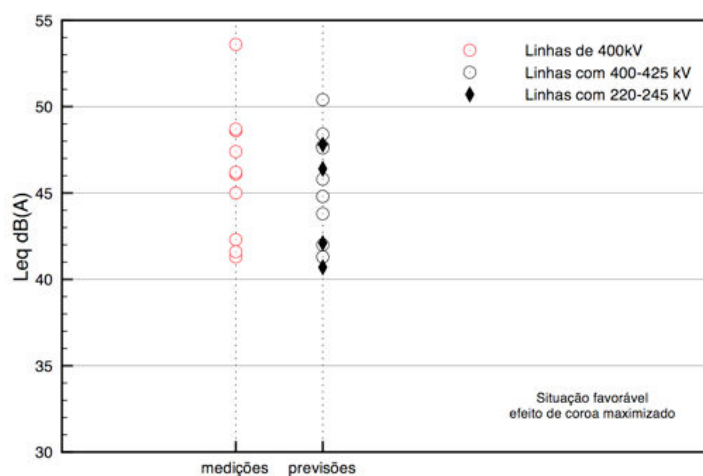


Figura 5 – Comparação entre valores medidos e previstos do ruído audível, em situação favorável.

Observando os valores previstos, pode notar-se que as linhas com tensão nominal de 220kV podem gerar níveis de L_{Aeq} semelhantes aos níveis gerados por algumas linhas de 400kV (nominais). Mais concretamente, é previsto que a linha Santarém-Zêzere (220kV) apresente níveis sonoros (em situação favorável) semelhantes aos da linha Pêgo-Rio Maior (400kV). Considerando-se uma tensão de 245kV, o nível de L_{Aeq} previsto é até superior.

A Figura 6 apresenta a gama de valores calculados comparada com a gama dos valores medidos, em condições desfavoráveis mas com efeito de coroa presente, estes só disponíveis para linhas de 400kV.

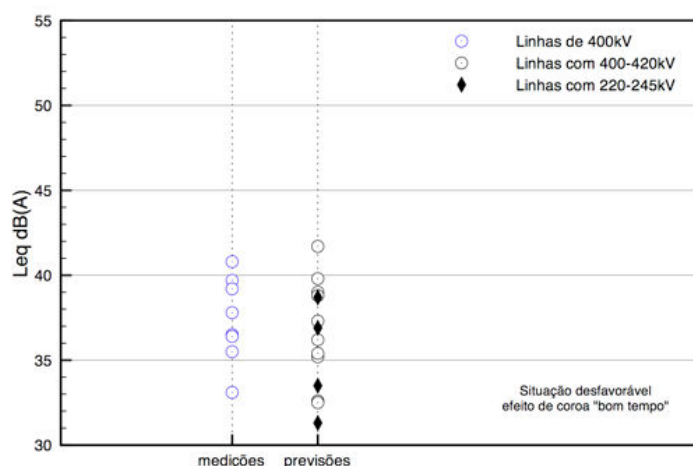


Figura 6 – Comparação entre valores medidos e previstos do ruído audível, em situação desfavorável.

Pode observar-se que a gama de valores previstos por esta componente do modelo está em excelente concordância com a gama de valores medidos. A diferença entre os valores previstos dos níveis de L_{Aeq} em situação favorável e desfavorável é de cerca de 8-10dB(A). As medições referem-se às linhas de 400 kV, as quais apresentaram, em graus diferentes, ruído audível gerado pelo efeito de coroa em condições desfavoráveis. A linha mais “ruidosa” registada foi a linha Batalha-Pêgo. Não se registou ou detectou o ruído gerado pelo efeito de coroa em condições desfavoráveis para as linhas de 220kV. O modelo prevê níveis de 31-33dB(A) para estas linhas (220kV nominais), sob o eixo central e em situação de emissão desfavorável. Foi, por exemplo, registado para a linha Santarém-Zêzere (220kV nominais) e sob o eixo central, um valor de L_{Aeq} de 33,2dB mas cujo efeito de coroa não era audível. Estes factos indiciam que, para as linhas de 220kV, o ruído audível gerado pelo efeito de coroa em situação desfavorável se confunde com ou seja mascarado pelo ruído ambiente.

6 Conclusões

Muitos aspectos fenomenológicos relativos ao efeito de coroa não se encontram suficientemente bem documentados nem compreendidos. Deste modo, os cálculos previsionais dos efeitos resultante dos fenómenos que acompanham o efeito de coroa, nomeadamente o ruído audível, recorrem a formulações empíricas ou semi-empíricas.

Através de um processo de análise selectiva e de aferição das fórmulas existentes e reportadas na literatura, foi elaborado um novo modelo do ruído audível gerado pelo efeito de coroa.

O modelo foi aferido e validado a partir de uma extensa base de dados recolhidos experimentalmente em condições meteorológicas diferenciadas e é perfeitamente funcional, constituindo um instrumento de previsão para apoio à avaliação e gestão dos eventuais impactes no ambiente sonoro, presentes ou futuros, decorrentes da exploração das linhas MAT.

Agradecimentos

O presente estudo resultou de uma parceria de assessoria tecnológica entre a Acusticontrol, Lda e a REN, S.A., cujo apoio se agradece.

Referências

- [1] Maruvada, P. Corona and Gap Discharge Phenomena, *EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and above*, Palo Alto (USA), 2004.
- [2] Trinh, G. Corona and Noise, *Electric Power Generation, Transmission and Distribution*, Ed. Leonard L. Grigsby, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton (USA), 2007.
- [3] Straumann, M.; Semmler M. About the mechanism of tonal emission from high voltage lines, *Proc. of 15th Int. Conf. On Gas Discharge and their Applications*, Toulouse 2004, vol. 1, pp 363-366.
- [4] Jones, R. Aeroacoustics of Aeolian Tones and Effects of Periodic Holes, *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 2 a 7 de Dezembro 2007, Adelaide (Australia).
- [5] Molino, J.; Zerdy, G.; Lerner, N.; Harwood, D. Psychoacoustic evaluation of the audible noise from EHV power lines, *7th IEEE Transmission and Distribution Conference*, 1 a 6 de Abril de 1979, Atlanta (USA).
- [6] Chartier, V.; Stearns, R. Formulas for predicting audible noise from overhead high voltage AC and DC lines, *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-100, nº 1, Janeiro 1981, pp. 121-129.
- [7] Yang, Kwang-Ho; Lee, Dong-IL; Hawang, G.; Park, June-Ho; Chartier, V. New formulas for predicting audible noise from overhead HVAC lines using evolutionary computations, *IEEE Trans. on PAS*, vol. 15, nº 4, Outubro 2000, pp. 1243-1251.
- [8] Bento Coelho, J. L.; Abreu, T; Ferreira, A. J.; Churro, D.; Estevens, A. M. Estudo e Modelação de Ruído de Linhas MAT, *Acusticontrol 21307A.1, Assessoria Tecnológica em Ruído de Linhas MAT*, Rede Eléctrica Nacional, S.A., Julho 2008.