

Engenharia Regulatória e Viabilidade Técnica em Radiodifusão: Análise Aprofundada da Documentação, Proteção de Aeródromos e Exposição Eletromagnética

1. Introdução e Contextualização do Cenário Regulatório Brasileiro

O ecossistema de radiodifusão no Brasil opera sob uma complexa intersecção de competências administrativas e técnicas, exigindo dos engenheiros e gestores uma compreensão holística que transcende a simples transmissão de sinais. A viabilidade de uma estação de Rádio (FM/AM) ou Televisão (TVD) não é determinada apenas pela disponibilidade espectral, mas por um tripé regulatório que envolve a outorga do serviço, a segurança operacional aeronáutica e a proteção da saúde pública contra radiações não ionizantes. Este relatório técnico destina-se a dissecar, com profundidade analítica, os requisitos documentais e os estudos de engenharia necessários para a apresentação de pleitos junto ao Ministério das Comunicações (MCom), à Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) e ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

A análise concentra-se na documentação crítica exigida para comprovar a viabilidade técnica, com ênfase especial nas Zonas de Proteção de Aeródromos (PBZPA) e na avaliação da exposição humana a campos eletromagnéticos (CEMRF), conforme as mais recentes atualizações normativas, incluindo o Ato nº 17.865/2023 e as diretrizes do SysAGA. Além disso, examina-se a metodologia de propagação "Deygout-Assis", mandatária no Brasil para cálculos de interferência, contextualizando sua aplicação na demonstração de convivência espectral.

1.1 A Estrutura de Competências e o Fluxo de Aprovação

O processo de licenciamento no Brasil é caracterizado por um fluxo não linear, onde a aprovação em uma instância depende, frequentemente, da validação em outra. O Ministério das Comunicações atua como o poder concedente, responsável pelas políticas públicas e pela outorga legal do serviço. No entanto, a materialidade técnica dessa outorga é auditada pela Anatel, que verifica a conformidade com os Planos Básicos de Distribuição de Canais (PBTVD, PBRTV, PBFM).

Paralelamente, e muitas vezes de forma precursora, o Comando da Aeronáutica (COMAER), através do DECEA, detém a autoridade para vetar qualquer infraestrutura vertical que ameace a segurança da navegação aérea. A documentação técnica, portanto, não é meramente burocrática; ela constitui a prova cabal de que a estação proposta harmoniza o interesse público da comunicação com os imperativos de segurança da aviação e saúde humana.

2. Viabilidade em Relação à Área de Proteção de Aeródromos (OPEA)

A análise de viabilidade de uma estação de radiodifusão começa, invariavelmente, pela sua localização geográfica e pelas restrições de altura impostas pelo ambiente aeronáutico. A infraestrutura de suporte (torres e mastros) é classificada como Objeto Projetado no Espaço Aéreo (OPEA), sujeitando-se a um rigoroso escrutínio técnico.

2.1 Fundamentação Normativa e o Sistema SysAGA

A regulação de OPEA no Brasil baseia-se na Portaria nº 957/GC3, de 2015, e nas Instruções do Comando da Aeronáutica (ICA), especificamente a ICA 11-3, que trata dos processos de análise, e a ICA 63-19, que estabelece os critérios técnicos. A evolução mais significativa neste domínio foi a digitalização completa do processo através do sistema **SysAGA** (Sistema de Gerenciamento de Processos da Área AGA). O SysAGA centralizou a submissão de projetos, eliminando o trâmite físico e impondo um padrão de dados geoespaciais de alta precisão. A documentação submetida ao SysAGA deve comprovar que o objeto proposto não viola as Superfícies Limitadoras de Obstáculos (OLS) dos aeródromos circundantes, ou, caso viole, que não representa risco à segurança ou regularidade das operações aéreas. A análise técnica não se limita apenas à geometria física, mas abrange também o potencial de interferência eletromagnética nos auxílios à navegação (como VOR, ILS e Radares), exigindo uma coordenação estreita entre os parâmetros de transmissão da Anatel e as salvaguardas do DECEA.

2.2 Documentação Técnica Exigida no SysAGA

A instrução processual no SysAGA demanda um conjunto documental que deve ser elaborado por profissionais habilitados, com Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) específica. A falha na apresentação ou a inconsistência nos dados geodésicos resulta no indeferimento sumário ou na emissão de exigências que atrasam o cronograma de implantação.

2.2.1 Requerimento e Ficha Informativa

O processo inicia-se com o preenchimento da Ficha Informativa no portal, onde são declaradas as coordenadas geográficas (Latitude e Longitude) e as altitudes. Um ponto crítico de atenção é o referencial vertical. O DECEA exige a utilização da **Altitude Ortométrica** (referenciada ao Nível Médio do Mar - MSL, Datum de Imbituba/Marégrafo), e não a Altitude Elipsoidal (fornecida nativamente por receptores GPS). A confusão entre estes referenciais pode introduzir erros métricos significativos, levando à aprovação de objetos que, na realidade, penetram superfícies de proteção, ou à rejeição indevida de objetos viáveis.

2.2.2 Levantamento Topográfico Planialtimétrico

Este é o documento central da análise de OPEA. Deve ser realizado por profissional de agrimensura ou engenharia cartográfica e conter:

- **Georreferenciamento:** Obrigatoriedade do uso do sistema geodésico de referência oficial do Brasil, o **SIRGAS2000** (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

2000).

- **Elementos da Planta:** A planta deve indicar a posição exata da base da torre, as cotas do terreno natural, e a altura total da estrutura, incluindo todos os apêndices (para-raios, balizamento noturno, antenas).
- **Vínculo com Aeródromos:** Se o objeto estiver dentro das áreas de proteção ou num raio de 20 km de um aeródromo, a planta deve indicar a direção e distância para o Ponto de Referência do Aeródromo (ARP) ou para as cabeceiras das pistas.

2.2.3 Peças Gráficas e Arquivos Digitais

Além das plantas em formato PDF assinadas digitalmente, o SysAGA frequentemente requer o upload de arquivos vetoriais (formato KMZ do Google Earth ou arquivos CAD) para facilitar a pré-análise automatizada do sistema. Estes arquivos devem estar em perfeita concordância com as coordenadas declaradas na Ficha Informativa. A discrepância de segundos na latitude ou longitude entre o arquivo digital e o levantamento topográfico é causa frequente de indeferimento.

2.3 Critérios de Análise: Superfícies Limitadoras e o Princípio da Sombra

A viabilidade técnica perante o DECEA depende da posição do objeto em relação às superfícies tridimensionais imaginárias definidas nos Planos de Zona de Proteção (PBZPA).

2.3.1 Superfícies de Proteção Críticas

- **Superfície de Transição:** Rampas laterais que protegem as aproximações baixas. Estruturas aqui são raramente permitidas.
- **Superfície Horizontal Interna:** Um plano ovalado situado a 45 metros acima da elevação do aeródromo. Em áreas urbanas densas, torres de radiodifusão frequentemente ultrapassam essa altura, exigindo análises especiais.
- **Superfície Cônica:** Estende-se da borda da horizontal interna com uma inclinação ascendente (geralmente 5%).
- **Superfícies de Aproximação e Decolagem:** Corredores alinhados com a pista. A penetração nestas áreas é crítica e geralmente proibitiva, a menos que se aplique o princípio da sombra.

2.3.2 O Princípio da Sombra (Shielding)

Uma estratégia essencial para a viabilidade de estações em centros urbanos é o uso do Princípio da Sombra. Este conceito técnico postula que um novo obstáculo não compromete a segurança se estiver "escondido" atrás de um obstáculo existente e permanente (como um morro ou um edifício consolidado) em relação à trajetória da aeronave. Para documentar a viabilidade via sombreamento, o engenheiro deve apresentar um estudo específico demonstrando que o topo da nova antena não ultrapassa o plano de sombra projetado pelo obstáculo existente (com uma margem de segurança descendente, tipicamente de 10% a partir do topo do obstáculo escudo). A documentação deve incluir o levantamento topográfico tanto do objeto proposto quanto do obstáculo escudo.

3. Níveis de Exposição à Radiação Não Ionizante (RNI)

Após assegurar a viabilidade física da estrutura junto ao DECEA, o foco da documentação para a Anatel volta-se para a segurança biofísica. A comprovação de que a estação opera dentro dos limites de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos (CEMRF) é condicionante para o licenciamento e para a entrada em operação.

3.1 Marco Regulatório Atualizado: O Ato nº 17.865/2023

A regulação brasileira sobre RNI sofreu uma atualização paradigmática com a publicação do **Ato nº 17.865**, de 30 de dezembro de 2023 (vigência a partir de março de 2024). Este ato revogou o anterior Ato nº 458/2019 e alinhou o Brasil às diretrizes de 2020 da Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP).

A nova norma refina os limites de exposição e os procedimentos de avaliação, introduzindo critérios mais detalhados para a média espacial e temporal dos campos, especialmente relevantes para tecnologias de transmissão digital e modulações complexas. A documentação apresentada à Anatel deve agora refletir explicitamente os cálculos baseados nestas novas tabelas e fórmulas.

3.2 O Relatório de Conformidade

O documento central para a comprovação de segurança é o **Relatório de Conformidade**. Este dossiê técnico deve ser elaborado e assinado por engenheiro habilitado e mantido à disposição da fiscalização, sendo parte integrante do processo de licenciamento no sistema Mosaico.

3.2.1 Conteúdo Obrigatório do Relatório

O relatório deve conter:

1. **Memória de Cálculo Detalhada:** Demonstração teórica dos níveis de campo elétrico (V/m) e densidade de potência (W/m^2) nas áreas acessíveis.
2. **Delimitação de Zonas:** Identificação clara das áreas de acesso restrito (população ocupacional) e áreas de livre acesso (população em geral).
3. **Análise de Áreas Críticas:** Mapeamento de hospitais, clínicas, escolas e creches num raio de 50 metros da instalação. O Ato 17.865 mantém a exigência de atenção especial a estas áreas, onde o princípio da precaução e a minimização visual e radiante são prioritários.
4. **Medições em Campo (Quando Aplicável):** Para estações de alta potência ou ambientes de múltiplos emissores (sites compartilhados) onde o cálculo teórico aponta proximidade com os limites, é obrigatória a realização de medições radiométricas utilizando sondas isotrópicas calibradas.

3.3 Metodologias de Cálculo e Fórmulas de Distância

A avaliação teórica baseia-se na determinação da **Distância de Conformidade (r)**, que é o raio mínimo de segurança ao redor da antena. O Ato 17.865 e seus anexos (especificamente o Subanexo II) estabelecem as fórmulas para este cálculo.

3.3.1 Fórmulas de Campo Distante

Para a região de campo distante, onde a relação entre campo elétrico e magnético é constante (impedância do espaço livre $\approx 377 \Omega$), a densidade de potência S (W/m^2) é calculada e comparada aos limites. A fórmula derivada para a distância mínima, referenciada como **Fórmula B.1** (para população em geral) e **Fórmula B.2** (para ocupacional) na documentação técnica da Anatel, deriva da relação de Friis com fatores de reflexão :

Onde:

- r : Distância de conformidade (metros).
- EIRP: Potência Efetiva Isotrópica Radiada (Watts). É o produto da potência do transmissor pelo ganho da antena e perdas do sistema.
- K: Fator de reflexão do solo. O regulamento tipicamente exige o uso de $K = 2.56$ (considerando reflexão de campo de 60% em tensão, somando-se 1.6 ao quadrado) ou $K = 4$ (para reflexão total de 100% em situações conservadoras), dependendo da geometria do site.
- S_{lim} : Limite de densidade de potência para a frequência de operação, conforme tabelas do Ato 17.865 (baseadas na ICNIRP).

3.3.2 Considerações sobre Campo Próximo

Em radiodifusão (FM e TV), devido às grandes aberturas verticais das antenas e altas potências, as áreas de interesse (como o topo de edifícios vizinhos ou a base da torre) frequentemente situam-se na região de **Campo Próximo Radiante** (Fresnel). Nestas regiões, a fórmula de campo distante subestima a complexidade do campo. O Ato exige, nestes casos, o uso de modelagem numérica (como Método dos Momentos ou FDTD) ou a aplicação de modelos de "envelope cilíndrico" (Cylindrical Envelope) para determinar as distâncias de segurança com maior precisão.

3.4 Dispensa de Avaliação (Isenção)

Certas estações podem ser dispensadas da apresentação do Relatório de Conformidade completo se atenderem a critérios de "inelegibilidade" baseados em baixa potência e altura de instalação. O **Subanexo IV** do Ato 17.865 define tabelas e fórmulas simplificadas para esta dispensa. Por exemplo, estações de radioamador ou serviços auxiliares de baixa potência que instalem suas antenas a uma altura tal que a distância para o público seja manifestamente superior à distância de conformidade calculada podem declarar a conformidade via formulário simplificado no Mosaico.

4. Documentação para Minicom e Anatel: O Projeto Técnico de Viabilidade

A apresentação ao Ministério das Comunicações e à Anatel consolida-se no **Projeto Técnico de Viabilidade**. Este documento deve demonstrar que a estação proposta atende aos objetivos de cobertura (função social da radiodifusão) sem causar interferências prejudiciais a outras estações licenciadas ou planejadas.

4.1 O Modelo de Propagação "Deygout-Assis"

Um requisito fundamental, e frequentemente motivo de indeferimento técnico por erro metodológico, é a escolha do modelo de propagação para os cálculos de interferência. Enquanto normas internacionais como a ITU-R P.1546 são usadas para estimativa estatística de cobertura (ponto-área), a Anatel, através de atos como o **Ato nº 9751/2022**, exige explicitamente o uso de métodos determinísticos ponto-a-ponto para a análise de interferência em terrenos acidentados, característicos da geografia brasileira. O método mandatório é o **ITU-R P.526 associado ao método de Assis (1971)**, conhecido na engenharia brasileira como **Deygout-Assis**.

4.1.1 A Física do Modelo Deygout-Assis

A necessidade deste modelo híbrido advém das limitações da teoria clássica de difração para a topografia tropical.

- **Método de Deygout (1966):** Resolve o problema de múltipla difração por gumes de faca (knife-edges). Ele identifica o obstáculo "principal" (aquele com maior parâmetro de difração $\lambda n u$) no perfil do terreno entre transmissor e receptor, calcula sua perda, e divide o percurso em sub-percursos, aplicando a lógica recursivamente. É excelente para cristas de montanhas agudas.
- **Correção de Assis (1971):** O engenheiro Mauro Soares de Assis, em seu trabalho seminal "A simplified solution to the problem of multiple diffraction over rounded obstacles", introduziu uma correção vital. A maioria dos morros brasileiros não são gumes perfeitos, mas possuem topos arredondados. A difração sobre uma superfície curva gera perdas adicionais significativas em comparação a um gume afiado.
 - Assis modelou os obstáculos como cilindros com raio de curvatura R .
 - A perda total é a soma da perda por gume de faca (Deygout) mais um termo de correção devido à curvatura (efeito cilíndrico).
 - A aplicação deste modelo tende a prever *maiores* atenuações do sinal interferente sobre morros arredondados, o que muitas vezes viabiliza tecnicamente canais que seriam inviáveis sob modelos puramente de gume de faca (que superestimariam o sinal interferente).

A documentação técnica (memoriais e mapas de cobertura) deve explicitar que o software de predição utilizado implementa este algoritmo específico. O uso de modelos genéricos (como Okumura-Hata ou Longley-Rice sem as devidas correções) para a análise de interferência é tecnicamente inadequado para a conformidade regulatória brasileira.

4.2 Relações de Proteção e Tabelas de Referência

A viabilidade técnica é comprovada matematicamente através das **Relações de Proteção (D/U)**. O projeto deve demonstrar que, no contorno protegido de qualquer estação vizinha, o sinal da nova estação (Interferente - U) está suficientemente abaixo do sinal da estação existente (Desejado - D).

Os valores de referência estão consolidados no **Ato nº 9751/2022** (para TV e RTV) e na **Resolução nº 721/2020** (para Rádio).

Tabela de Relações de Proteção (TV Digital)

A tabela abaixo exemplifica os critérios críticos para TV Digital que devem constar nos cálculos do projeto:

Cenário (Desejado / Interferente)	Relação Co-Canal (dB)	Adjacente Inferior (N-1)	Adjacente Superior (N+1)
Digital / Digital	19 dB	-31 dB	-31 dB
Digital / Analógico	34 dB	-31 dB	-31 dB
Analógico / Digital	7 dB	-6 dB	-12 dB
Analógico / Analógico	45 dB	-6 dB	-12 dB

Interpretação: Para proteger uma estação digital vizinha operando no mesmo canal, o sinal da nova estação digital não pode exceder o nível do sinal protegido menos 19 dB. Se o contorno protegido é definido em 51 dB μ V/m (UHF), o sinal interferente máximo permitido é $51 - 19 = 32 \text{ dB}$.

4.3 Elementos do Projeto Técnico (Checklist)

Para submissão no sistema Mosaico da Anatel e instrução processual no MCom, o projeto deve conter:

1. **Memorial Descritivo:** Detalhamento dos equipamentos (transmissor, cabos, antenas), com indicação de perdas e ganhos para cálculo da ERP.
2. **Diagramas de Irradiação:** Diagramas polar horizontal e vertical da antena proposta. O uso de tilt elétrico e mecânico é uma ferramenta crucial para reduzir a radiação em direção a estações vizinhas (viabilidade espectral) e em direção ao solo próximo (viabilidade RNI).
3. **Mapas de Cobertura:** Gerados com o modelo ITU-R P.1546 (para o serviço) e Deygout-Assis (para interferência). Devem mostrar o contorno protegido (ex: 66 dB μ V/m para FM local, 51 dB μ V/m para TV Digital UHF) sobre a mancha urbana.
4. **Estudo de Viabilidade de Frequência:** Planilha detalhando todas as estações co-canais e adjacentes num raio de coordenação (tipicamente até 400 km), com o cálculo das margens de proteção (D/U) em cada ponto crítico.
5. **Qualificação Técnica:** ART de projeto e instalação.

5. Estratégias de Integração Documental e Conclusão

A elaboração da documentação para MCom, Anatel e DECEA não deve ser tratada como três tarefas isoladas, mas como um processo iterativo de engenharia.

5.1 O Ciclo de Otimização

1. **Restrição Aeronáutica (Input):** O DECEA define o teto máximo da torre (ex: 50 metros devido à Superfície Cônica).
2. **Adaptação RNI (Processamento):** Com a torre limitada a 50m, as antenas de alta potência ficam mais próximas do solo. O cálculo RNI (Ato 17.865) deve ser refeito. Se a distância de conformidade (r) tocar o solo ou edifícios vizinhos, deve-se reduzir a potência ou alterar o diagrama da antena.
3. **Viabilidade de Espectro (Output):** Com a altura e potência ajustadas pelas restrições aeronáuticas e de saúde, roda-se o modelo Deygout-Assis. A cobertura atinge os 70% da área urbana exigidos pelo Ato 9751? Se não, busca-se um novo local e o ciclo reinicia.

5.2 Conclusão

A aprovação de projetos de radiodifusão no atual cenário normativo brasileiro exige precisão. A "viabilidade" é um estado de equilíbrio entre a segurança física do espaço aéreo (comprovada via SysAGA e topografia SIRGAS2000), a segurança biológica da população (comprovada via Relatório de Conformidade RNI e Ato 17.865) e a integridade espectral (comprovada via modelo Deygout-Assis e Relações de Proteção).

A inobservância dos detalhes técnicos aqui expostos — seja a confusão de Datums altimétricos no OPEA, a aplicação incorreta das fórmulas B.1/B.2 no RNI, ou o uso de modelos de propagação simplistas — resulta invariavelmente em atrasos regulatórios. Portanto, a documentação deve ser encarada como a expressão formal de um rigoroso projeto de engenharia, alinhado às melhores práticas e às exigências legais vigentes.

Referências citadas

1. Guia para autorização de OBJETOS PROJETADOS NO ESPAÇO AÉREO (OPEA) - Prefeitura de Navegantes -, <https://navegantes.sc.gov.br/wp-content/uploads/2024/07/opea.pdf>
2. Guia para autorização OBJETOS PROJETADOS NO ESPAÇO AÉREO (OPEA) - Prefeitura, https://prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/licenciamentos/guia_srpvsp.pdf
3. COMAER Ica - 63-19 - 20200901 | PDF | Regras de voo por instrumentos | Pista - Scribd, <https://pt.scribd.com/document/485387194/COMAER-ica-63-19-20200901>
4. Tutorial OPEA | PDF | Aeroporto - Scribd, <https://pt.scribd.com/document/685385484/Tutorial-OPEA>
5. Sistema de Gerenciamento de Processos AGA - DECEA, <https://aga.decea.mil.br/sysaga>
6. PROCESSOS DA ÁREA DE AERÓDROMOS (AGA) NO ÂMBITO DO COMAER - SysAGA, <https://sysaga.decea.mil.br/download/55>
7. Como abrir processo para OPEA? - Flight Consultoria Aeronáutica, <https://flightconsultoria.com.br/como-abrir-processo-para-opea/>
8. Anatel atualiza os requisitos técnicos para a exposição humana a ..., <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-atualiza-os-requisitos-tecnicos-para-a-exposicao-humana-a-campos-eletromagneticos>
9. Ato nº 17865, de 30 de dezembro de 2023 - Anatel, <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2023/1914-ato-17865>
10. Anatel atualiza requisitos para exposição a campos eletromagnéticos - DPL News, <https://dplnews.com/anatel-atualiza-requisitos-para-exposicao-a-campos-eletromagneticos/>
11. ANATEL publica novas normas para distâncias mínimas de antenas até a população, <https://unopr.com.br/anatel-publica-novas-normas-para-distancias-minimas-de-antenas-ate-a-populacao/>
12. Ato nº 9751, de 06 de julho de 2022 - Anatel, <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2022/1688-ato-9751>
13. Ato nº 9751, de 06 de julho de 2022 - Anatel - Agência Nacional de Telecomunicações, <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/component/content/article/159-atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2022/1688-ato-9751>
14. Optimization of the propagation model choice by measuring field and artificial intelligence - SET, <https://www.set.org.br/ijbe/ed4/Artigo%201.pdf>
15. BROADCAST ENGINEERING - SET, <https://www.set.org.br/ijbe/ed5/IJBE-v5-2019.pdf>
16. The Deygout's method | Download Scientific Diagram - ResearchGate, https://www.researchgate.net/figure/The-Deygouts-method_fig1_263534570
17. Fast

computation of radio wave propagation effects,
<http://www.tommsch.com/images/science/diffraction.pdf> 18. A simplified solution to the problem
of multiple diffraction over rounded obstacles, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1139895/>
19. Recommendation ITU-R P.526-11,
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-11-200910-S%21%21PDF-E.pdf