

# Relatório Técnico Avançado: Implementação Computacional e Análise Normativa de Modelos de Propagação (ITU-R P.1546 e Método Deygout-Assis) no Contexto da Regulação Brasileira

## 1. Introdução e Contextualização do Cenário de Radiodifusão

O planejamento de redes de radiodifusão e telecomunicações no Brasil atravessa um período de transformação tecnológica e regulatória sem precedentes. A consolidação do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T), a migração das emissoras de rádio AM para a faixa de FM e a contínua refarming do espectro para acomodar serviços móveis de banda larga (IMT/5G) exigem um rigor técnico cada vez maior na predição de cobertura e análise de interferência. Neste cenário, a precisão dos algoritmos de propagação de ondas eletromagnéticas deixa de ser apenas uma questão acadêmica para se tornar um requisito legal e operacional crítico.

A Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), através da implementação do sistema **Mosaico**, digitalizou e automatizou os processos de licenciamento e análise técnica. O sucesso na submissão de projetos técnicos — seja para a inclusão de um novo canal no Plano Básico, seja para a alteração de características técnicas de uma estação existente — depende estritamente da conformidade com modelos de propagação específicos. Entre estes, destacam-se a Recomendação **ITU-R P.1546**, utilizada para cálculos estatísticos de cobertura ponto-área e definição de contornos protegidos, e os métodos determinísticos de difração, especificamente o método de **Deygout**, frequentemente refinado pela correção de curvatura proposta pelo pesquisador brasileiro **Mauro Soares de Assis**.

Este relatório apresenta uma análise exaustiva e detalhada sobre a implementação computacional destes modelos. O objetivo é fornecer a engenheiros, pesquisadores e desenvolvedores de software um guia definitivo que abranja desde os fundamentos físicos e matemáticos até a codificação prática em linguagens de alto nível (Python, MATLAB) e desempenho (C++), tudo sob a ótica das exigências normativas da Anatel (Atos nº 9751, 3114, 3115 e Resolução nº 721).

### 1.1 A Evolução dos Requisitos Técnicos da Anatel

Historicamente, o planejamento de radiodifusão no Brasil baseava-se em curvas de propagação simplificadas, como as da FCC (Federal Communications Commission) ou a antiga recomendação ITU-R P.370. No entanto, a complexidade do relevo brasileiro — caracterizado por vastos planaltos, serras abruptas (como a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira) e densas áreas urbanas — demonstrou que modelos puramente estatísticos eram insuficientes para

garantir a convivência harmoniosa entre estações, especialmente com a introdução de modulações digitais (OFDM) que possuem requisitos de relação de proteção (D/U) distintos e comportamentos de limiar abruptos ("cliff effect").

A atualização regulatória, consolidada na Resolução nº 721/2020 e seus Atos complementares, institucionalizou o uso da ITU-R P.1546-5 (ou versões superiores) como o padrão ouro para a determinação da intensidade de campo. Paralelamente, para a análise detalhada de enlaces ponto-a-ponto ou verificação de desobstrução em trajetos críticos de interferência, a agência e a engenharia nacional consagraram o uso de métodos que consideram o perfil do terreno. É neste nicho que o método de Deygout, corrigido por Assis para obstáculos arredondados (cilindros), se torna indispensável. Enquanto o método clássico de gume de faca (Knife-Edge) tende a ser otimista demais em terrenos ondulados, subestimando a atenuação e prevenindo interferências inexistentes ou coberturas fantasmas, a correção de Assis introduz a penalidade física real causada pela difração sobre superfícies convexas, alinhando a predição teórica com as medições de campo.

## 1.2 Objetivos e Estrutura do Relatório

Este documento foi estruturado para cobrir todas as facetas da solicitação original, expandindo-as para oferecer um manual de referência completo. Abordaremos:

1. **Fundamentação Teórica Profunda:** Uma dissecação das equações de Fresnel, da geometria do elipsoide e das integrais que regem a difração, fornecendo a base para entender por que os modelos funcionam.
2. **A Recomendação ITU-R P.1546:** Análise detalhada dos procedimentos de interpolação, correção de ângulo de clareira do terreno (TCA) e distinção entre trajetos terrestres e marítimos.
3. **O Método Deygout e a Correção de Assis:** Explicação passo a passo do algoritmo recursivo de Deygout e a derivação matemática da correção cilíndrica de Assis.
4. **Implementação Computacional:** Exemplos de código, arquitetura de software e bibliotecas em Python, MATLAB e C++, com foco em desempenho e precisão numérica.
5. **Interface com o Sistema Mosaico:** Detalhamento dos formatos de arquivo, requisitos de upload e parâmetros de engenharia aceitos pela Anatel.
6. **Parâmetros de Proteção e Planejamento:** Tabelas completas e análise das relações de proteção para TV Digital e FM, essenciais para a validação dos cálculos.

## 2. Recomendação ITU-R P.1546: O Padrão para Predição Ponto-Área

A Recomendação ITU-R P.1546, intitulada "Método para predições ponto-área para serviços terrestres na faixa de frequências de 30 MHz a 4.000 MHz", é a espinha dorsal do planejamento de cobertura na Anatel. Diferente de modelos determinísticos que exigem um perfil de terreno detalhado para cada radial, a P.1546 baseia-se em curvas empíricas derivadas de décadas de medições, ajustadas por parâmetros estatísticos e geográficos.

### 2.1 A Estrutura das Curvas de Propagação

O núcleo da P.1546 não é uma equação única, mas sim uma vasta família de curvas que relacionam a intensidade de campo (E) com a distância (d). A implementação computacional

deste modelo é, essencialmente, um exercício avançado de interpolação multidimensional. As curvas são tabuladas para os seguintes parâmetros discretos:

- **Frequências Nominais (f):** 100, 600 e 2.000 MHz.
- **Alturas Efetivas da Antena Transmissora ( $h_1$ ):** Valores variando de 10 m a 1.200 m.
- **Porcentagens de Tempo (t):** 50%, 10% e 1%.
- **Tipos de Percurso:** Terra, Mar Frio e Mar Quente.

Para uma dada situação de engenharia — por exemplo, uma estação de FM em 98,5 MHz com antena a 135 metros operando em região mista — o software deve realizar interpolações logarítmicas e lineares para extrair o valor correto.

### 2.1.1 O Processo de Interpolação

A precisão do modelo depende da ordem correta das interpolações. O algoritmo deve seguir a seguinte hierarquia, conforme definido no Anexo 5 da recomendação :

1. **Interpolação de Altura ( $h_1$ ):** Para cada frequência nominal e porcentagem de tempo, o campo é interpolado entre as curvas de altura inferior ( $h_{\{inf\}}$ ) e superior ( $h_{\{sup\}}$ ). A altura efetiva  $h_1$  é definida como a altura da antena sobre o nível médio do terreno entre 3 km e 15 km na direção do receptor.
2. **Interpolação de Frequência (f):** Após obter os campos para a altura correta nas frequências nominais (ex: 100 e 600 MHz), realiza-se a interpolação para a frequência de operação.
3. **Interpolação de Distância:** As tabelas fornecem valores para distâncias logarítmicas. A interpolação deve seguir a natureza da propagação (lei do inverso do quadrado ou guias de onda atmosféricos), geralmente linear em  $\log(d)$ .

### 2.2 O Ângulo de Clareira do Terreno (TCA)

Uma das inovações mais significativas da P.1546 em relação à P.370 é a introdução da correção pelo Ângulo de Clareira do Terreno (Terrain Clearance Angle - TCA). O TCA, denotado por  $\theta_{tca}$ , refina a predição considerando a obstrução local nas imediações do receptor (ou transmissor, dependendo da reciprocidade).

**Cálculo do TCA:** O TCA não exige o perfil completo do enlace, mas sim uma análise detalhada dos primeiros 16 km a partir da antena em questão. O ângulo é medido em relação à linha horizontal no local da antena:

- $\theta_{tca} > 0$ : Indica que o terreno sobe na direção do trajeto, criando obstrução. A intensidade de campo deve ser atenuada.
- $\theta_{tca} < 0$ : Indica que o terreno desce (ex: transmissor no topo de um morro com vista para um vale). A intensidade de campo pode ser reforçada devido à melhor visibilidade.

A correção aplicada ao campo básico ( $E_b$ ) é dada por uma função não linear de  $\theta_{tca}$ , que deve ser implementada com cuidado para evitar descontinuidades. Em implementações de software como a Py1546 e p1546 para MATLAB, a função `calc_tca` percorre o Modelo Digital de Elevação (MDE) para determinar este ângulo crítico.

### 2.3 Desafios de Implementação e Bibliotecas Existentes

Para engenheiros que desejam integrar a P.1546 em seus sistemas, a construção das tabelas de dados ("look-up tables") é a etapa mais trabalhosa. Felizmente, existem bibliotecas

open-source e acadêmicas que já digitalizaram essas curvas.

### 2.3.1 Python: A Biblioteca Py1546 e o Ecossistema itur

A biblioteca Py1546, desenvolvida por eeveetza, é uma implementação de referência da Recomendação ITU-R P.1546-6.

\* **Instalação e Estrutura:** A biblioteca pode ser instalada via pip diretamente do repositório git. A estrutura do código é modular, separando as tabelas de dados da lógica de interpolação.  
bash python -m pip install "git+https://github.com/eeveetza/Py1546/#egg=Py1546"

- **Exemplo de Uso Prático (Python):** O código abaixo ilustra como calcular a perda básica de transmissão ( $L_b$ ) para um cenário típico de radiodifusão FM no Brasil.

```
from Py1546 import P1546
import numpy as np

# Parâmetros do Cenário
freq_mhz = 98.5          # Frequência da Rádio FM
time_pct = 50.0          # 50% do tempo (Serviço)
h_eff_tx = 150.0         # Altura efetiva do transmissor (m)
h_rx = 10.0              # Altura do receptor (m) - Típico outdoor
clutter_rx = 10.0        # Altura representativa do clutter
                          # (Rural/Suburbano)
path_type = 'Land'       # Trajeto terrestre

# Vetor de distâncias (km) - Ex: Radial de 1km a 100km
distances = np.arange(1, 101, 1.0)

# Definição do vetor de zonas (todas 'Land' neste exemplo)
path_zones = [path_type for _ in distances]

# Flag para informação de terreno (0 = sem perfil detalhado)
terrain_info = 0

# Cálculo
# A função retorna Campo (E) e Perda Básica (Lb)
E_field, L_basic = P1546.bt_loss(
    f=freq_mhz,
    t=time_pct,
    heff=h_eff_tx,
    h2=h_rx,
    R2=clutter_rx,
    area=path_type,
    d_v=distances,
    path_c=path_zones,
    pathinfo=terrain_info
)

print(f"Campo a 50km: {E_field:.2f} dBuV/m")
```

Além da Py1546, a biblioteca itur fornece implementações de recomendações auxiliares, como a P.453 (Índice de Refração) e P.837 (Precipitação), permitindo criar um ecossistema completo de predição climática e de propagação.

### 2.3.2 MATLAB: Ferramentas da Comunidade

No ambiente MATLAB, amplamente utilizado em universidades brasileiras (como Inatel, UnB, PUC-Rio), a implementação P1546FieldStrMixed.m é a referência. Ela se destaca pela capacidade de lidar com **percursos mistos** (terra-mar), aplicando o método de Millington implicitamente, o que é crucial para estações costeiras em cidades como Rio de Janeiro, Salvador ou Florianópolis.

O código MATLAB permite a passagem de argumentos opcionais como pares Nome-Valor, facilitando a configuração de parâmetros como TCA, Clutter Height e Location Percentage (q%, que difere da porcentagem de tempo). A função validateP1546.m incluída no repositório é essencial para garantir que a implementação esteja em conformidade com os valores de teste oficiais da UIT.

---

## 3. Difração Determinística: O Método Deygout e a Correção de Assis

Enquanto a P.1546 oferece uma visão macroscópica e estatística, a engenharia de enlaces críticos e a análise de "zonas de sombra" exigem uma abordagem determinística. Aqui, o perfil exato do terreno entre transmissor e receptor é analisado para calcular a perda por difração.

### 3.1 Fundamentos da Difração por Gume de Faca (Knife-Edge)

A base de todos os modelos de difração é o princípio de Huygens-Fresnel. Quando uma onda eletromagnética encontra um obstáculo, cada ponto da frente de onda age como uma fonte secundária. A interferência dessas ondas secundárias no receptor determina a atenuação. O parâmetro fundamental é o parâmetro de difração de Fresnel-Kirchhoff,  $\nu$ :

Onde:

- $h$  é a altura do obstáculo acima da linha de visada (LOS). Se  $h < 0$ , há desobstrução (mas ainda pode haver perda se estiver dentro da 1ª zona de Fresnel).
- $d_1$  e  $d_2$  são as distâncias do obstáculo aos terminais.
- $\lambda$  é o comprimento de onda.

A perda por um único gume de faca,  $J(\nu)$ , é dada pela aproximação de Lee (amplamente usada em código por evitar integrais complexas) :

- Se  $\nu \leq -0.7$ :  $J(\nu) = 0$  dB.
- Se  $-0.7 < \nu \leq 0$ :  $J(\nu) = 20 \log(0.5 - 0.62\nu)$  dB.
- Se  $0 < \nu \leq 1$ :  $J(\nu) = 20 \log(0.5 \cdot e^{-0.95\nu})$  dB.
- Se  $\nu > 1$ :  $J(\nu) = 20 \log(0.225 / \nu)$  dB.

### 3.2 O Algoritmo de Deygout (1966)

Em terrenos reais, raramente existe apenas um obstáculo. O método de Deygout propõe uma solução hierárquica para múltiplos obstáculos:

1. **Busca do Obstáculo Principal:** Calcula-se  $n$  para todos os pontos do perfil. O ponto com o maior  $n$  é o obstáculo principal (M).
2. **Cálculo da Perda Principal:** Calcula-se a perda  $L_M$  considerando M como um gume de faca isolado.
3. **Subdivisão:** O perfil é dividido em dois segmentos: Transmissor  $\rightarrow$  M e M  $\rightarrow$  Receptor.
4. **Recursividade:** O processo é repetido para encontrar o obstáculo secundário em cada segmento. A perda desses obstáculos secundários é adicionada à perda principal (com correções empíricas em algumas variantes).

O método de Deygout é considerado mais preciso que o método de Bullington (que simplifica o terreno para um único obstáculo equivalente) e mais robusto que o Epstein-Peterson para obstáculos dominantes.

### 3.3 A Correção de Assis (1971): O Problema da Convexidade

A grande limitação do modelo de gume de faca é assumir que o topo da montanha é infinitamente fino. No Brasil, o relevo é frequentemente composto por morros arredondados ("meias-laranjas") e chapadões. Nesses casos, a onda não apenas difrata na aresta, mas desliza sobre a superfície curva, sofrendo uma atenuação adicional significativa.

**Mauro Soares de Assis**, em seu artigo seminal "A simplified solution to the problem of multiple diffraction over rounded obstacles" (IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1971), propôs integrar a teoria da difração por cilindros ao método de Deygout.

#### 3.3.1 Formulação Matemática da Correção

A correção de Assis substitui a perda do gume de faca ( $L_{ke}$ ) por uma perda total ( $L_{total}$ ) que inclui um termo de curvatura ( $L_{cil}$ ):

O cálculo do termo de curvatura baseia-se na Recomendação ITU-R P.526 para cilindros. A aproximação utilizada por Assis e consolidada na engenharia brasileira é dada por:

$$L_{cil} \approx 11.7 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{\pi R}{\lambda}} \quad (\text{para } \theta \cdot \sqrt{\frac{2\pi R}{\lambda}} < 1)$$

Ou, numa formulação mais robusta derivada das curvas da ITU-R P.526, a perda adicional (excesso sobre o gume de faca) depende de dois parâmetros adimensionais:

1. **Parâmetro de Curvatura (m):** *Nota: Esta é uma simplificação. A forma rigorosa usa o raio da Terra equivalente.* A formulação mais direta usada em implementações computacionais para o termo adicional de curvatura (em dB) é: Onde  $\rho$  é um índice de curvatura normalizado.

No entanto, a implementação "clássica" da correção de Assis em software de engenharia segue o seguinte algoritmo híbrido:

1. Identificar o obstáculo dominante via **Deygout**.
2. Extrair os pontos do terreno no entorno do pico dominante (janela de análise).
3. Ajustar uma parábola ( $y = ax^2 + bx + c$ ) a esses pontos para estimar o **Raio de Curvatura (R)** no vértice.
4. Calcular o ângulo de difração total  $\theta$  (soma dos ângulos de depressão de ambos os lados).
5. Calcular a perda adicional de curvatura  $L_{add}$  usando a fórmula simplificada: *(Atenção: Os coeficientes exatos variam levemente entre a publicação original de 1971 e adaptações modernas, mas o termo  $\theta (R/\lambda)^{1/3}$  é a assinatura física da*

*correção).*

## 4. Estratégias de Implementação Computacional (Código)

Nesta seção, apresentamos como traduzir a teoria acima em código funcional. Focaremos na estrutura dos dados e nos algoritmos críticos.

### 4.1 Python: Implementação Deygout com Assis

Python é ideal para prototipagem rápida e análise de dados. Usaremos numpy para vetorização e scipy.optimize para o ajuste do raio de curvatura.

```
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit

# Constantes Físicas
VELOCIDADE_LUZ = 3e8

def calcular_lambda(frequencia_mhz):
    return VELOCIDADE_LUZ / (frequencia_mhz * 1e6)

def perda_gume_faca_lee(nu):
    """
    Aproximação de Lee para a integral de Fresnel (Loss em dB).
    """
    if nu <= -0.7:
        return 0.0
    elif nu <= 0.0:
        return 6.0 + 9.0 * nu + 1.27 * (nu**2)
    elif nu <= 1.0:
        return 6.0 + 9.0 * nu - 1.27 * (nu**2)
    else:
        return 13.0 + 20.0 * np.log10(nu)

def estimar_raio_curvatura(distancias, alturas, indice_pico,
                           janela=5):
    """
    Estima o raio R ajustando uma parábola aos pontos locais do
    terreno.
    
$$y = ax^2 + bx + c \rightarrow R = 1 / |2a|$$

    """
    inicio = max(0, indice_pico - janela)
    fim = min(len(distancias), indice_pico + janela + 1)

    x_local = distancias[inicio:fim]
    y_local = alturas[inicio:fim]
```

```

if len(x_local) < 3:
    return 0.0 # Pontos insuficientes, trata como gume de faca

# Função quadrática para ajuste
def parabola(x, a, b, c):
    return a * x**2 + b * x + c

try:
    # Normaliza X para evitar instabilidade numérica
    x_norm = x_local - x_local[len(x_local)//2]
    popt, _ = curve_fit(parabola, x_norm, y_local)
    a = popt

    if abs(a) < 1e-10: # Terreno plano
        return 0.0

    R = 1.0 / abs(2 * a)
    return R
except:
    return 0.0

def correcao_assis(R, lambda_val, theta_rad):
    """
    Calcula a perda adicional por curvatura (Baseado em Assis/ITU-R
    P.526).
    """
    if R <= 1.0: # Raio desprezível, trata como gume
        return 0.0

    # Termo Chi da ITU-R P.526 (simplificado para Assis)
    # A fórmula exata pode envolver funções de Bessel/Hankel para
    # precisão total,
    # mas a aproximação logarítmica é padrão em engenharia de
    # radiodifusão.

    termo_geometrico = np.power( (np.pi * R) / lambda_val, 1/3 )
    chi = 11.7 * termo_geometrico * theta_rad

    # Perda adicional em dB
    # Se Chi for muito pequeno, a perda tende a zero.
    loss_curvatura = 6.0 * np.log10(1 + chi)

    return max(0.0, loss_curvatura)

def deygout_recurso(dist, alt, tx_h, rx_h, lambda_val,
    perfil_completo_d, perfil_completo_h):
    """
    Algoritmo de Deygout com injeção da Correção de Assis.

```



```

"""
n_pontos = len(dist)
if n_pontos <= 2:
    return 0.0

# 1. Definir Linha de Visada (LOS)
d_total = dist[-1] - dist
inclina = (rx_h - tx_h) / d_total
los = tx_h + inclina * (dist - dist)

# 2. Calcular Nu de Fresnel para todos os pontos
h_obs = alt - los # Altura do obstáculo acima da LOS
d1 = dist - dist
d2 = dist[-1] - dist

# Evita divisão por zero nas pontas
with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
    nu_vec = h_obs * np.sqrt(2 * (d1 + d2) / (lambda_val * d1 *
d2))
nu_vec = -99; nu_vec[-1] = -99 # Ignora terminais

# 3. Encontrar Obstáculo Dominante
idx_max = np.argmax(nu_vec)
nu_max = nu_vec[idx_max]

if nu_max < -0.7: # Critério de desobstrução (0.6 da 1ª Zona de
Fresnel)
    return 0.0

# 4. Calcular Perda Base (Knife Edge)
perda_principal = perda_gume_faca_lee(nu_max)

# 5. --- APLICAÇÃO DA CORREÇÃO DE ASSIS ---
# Recupera índice global para análise de terreno
idx_global = np.where(perfil_completo_d == dist[idx_max])

# Estima Raio (R)
R = estimar_raio_curvatura(perfil_completo_d, perfil_completo_h,
idx_global)

# Calcula ângulo de difração (theta)
# Theta ~ (h_obs / d1) + (h_obs / d2) para ângulos pequenos
theta = np.arctan(h_obs[idx_max] / d1[idx_max]) +
np.arctan(h_obs[idx_max] / d2[idx_max])

perda_curvatura = correcao_assis(R, lambda_val, theta)
perda_no_no = perda_principal + perda_curvatura
# -----

```

```

# 6. Recursão (Esquerda e Direita)
# Sub-trajeto TX -> Obstáculo
perda_esq = deygout_recursivo(dist[:idx_max+1], alt[:idx_max+1],
                             tx_h, alt[idx_max], lambda_val,
perfil_completo_d, perfil_completo_h)

# Sub-trajeto Obstáculo -> RX
perda_dir = deygout_recursivo(dist[idx_max:], alt[idx_max:],
                             alt[idx_max], rx_h, lambda_val,
perfil_completo_d, perfil_completo_h)

return perda_no_no + perda_esq + perda_dir

# Wrapper de Exemplo
def calcular_enlace(perfil_d, perfil_h, freq_mhz):
    # Alturas de antena (ex: Torre de 50m e Rx de 10m)
    tx_abs = perfil_h + 50.0
    rx_abs = perfil_h[-1] + 10.0
    lamb = calcular_lambda(freq_mhz)

    perda_difracao = deygout_recursivo(perfil_d, perfil_h, tx_abs,
rx_abs, lamb, perfil_d, perfil_h)

    # Perda Espaço Livre (FSPL)
    d_km = (perfil_d[-1] - perfil_d) / 1000.0
    fspl = 32.4 + 20*np.log10(d_km) + 20*np.log10(freq_mhz)

    return fspl + perda_difracao

```

## 4.2 C++: Desempenho para o Sistema Mosaico

Para processar milhares de radiais e gerar os contornos protegidos exigidos pelo Mosaico, a linguagem C++ é superior. A gestão de memória para carregar dados SRTM/ALOS é crítica. Abaixo, um esboço de uma estrutura de classes (PropEngine) otimizada. Recomenda-se o uso de bibliotecas como **GDAL** para leitura dos rasters (GeoTIFF) e **Eigen** para os cálculos matriciais de ajuste de curva (Assis).

```

#include <vector>
#include <cmath>
#include <algorithm>
#include <iostream>

// Constantes
const double SPEED_OF_LIGHT = 299792458.0;

struct TerrainPoint {
    double distance; // metros

```

```

        double elevation; // metros
    };

class DeygoutAssisCalculator {
private:
    double frequency_hz;
    double wavelength;

    double KnifeEdgeLoss(double nu) {
        if (nu <= -0.7) return 0.0;
        if (nu <= 0.0) return 6.0 + 9.0 * nu + 1.27 * nu * nu;
        if (nu <= 1.0) return 6.0 + 9.0 * nu - 1.27 * nu * nu;
        return 13.0 + 20.0 * log10(nu);
    }

    double EstimateRadius(const std::vector<TerrainPoint>& profile,
int peak_idx) {
        // Implementação simplificada de mínimos quadrados para  $y = ax^2 + bx + c$ 
        // Em produção, usar Eigen::HouseholderQR
        // Retorna  $R = 1 / |2a|$ 
        //... (código de álgebra linear omitido por brevidade)
        return 5000.0; // Valor dummy para exemplo (R = 5km)
    }

    double CylinderCorrection(double R, double theta) {
        if (R < 10.0) return 0.0; // Gume de faca
        double term = (M_PI * R) / wavelength;
        double chi = 11.7 * pow(term, 1.0/3.0) * theta;
        return 6.0 * log10(1.0 + chi);
    }

public:
    DeygoutAssisCalculator(double freq_mhz) {
        frequency_hz = freq_mhz * 1e6;
        wavelength = SPEED_OF_LIGHT / frequency_hz;
    }

    double Calculate(const std::vector<TerrainPoint>& profile, double
tx_h, double rx_h) {
        return RecursiveDeygout(profile, 0, profile.size() - 1, tx_h,
rx_h);
    }

    double RecursiveDeygout(const std::vector<TerrainPoint>& profile,
int start_idx, int end_idx, double h_start, double h_end) {
        if (end_idx - start_idx < 2) return 0.0;

```

```

        double d_total = profile[end_idx].distance -
profile[start_idx].distance;
        double slope = (h_end - h_start) / d_total;

        double max_nu = -10.0;
        int max_idx = -1;

        // Loop principal - Pode ser paralelizado com OpenMP para
perfis muito longos
        // #pragma omp parallel for reduction(max: max_nu)
        for (int i = start_idx + 1; i < end_idx; ++i) {
            double d1 = profile[i].distance -
profile[start_idx].distance;
            double d2 = profile[end_idx].distance -
profile[i].distance;

            double los_h = h_start + slope * d1;
            double h_obs = profile[i].elevation - los_h;

            double nu = h_obs * sqrt(2.0 * (d1 + d2) / (wavelength *
d1 * d2));

            if (nu > max_nu) {
                max_nu = nu;
                max_idx = i;
            }
        }

        if (max_nu <= -0.7) return 0.0;

        double loss_main = KnifeEdgeLoss(max_nu);

        // Assis Correction
        double R = EstimateRadius(profile, max_idx);
        double d1_main = profile[max_idx].distance -
profile[start_idx].distance;
        double d2_main = profile[end_idx].distance -
profile[max_idx].distance;
        double h_obs_main = profile[max_idx].elevation - (h_start +
slope * d1_main);
        double theta = atan(h_obs_main / d1_main) + atan(h_obs_main /
d2_main);

        double loss_curv = CylinderCorrection(R, theta);

        // Recursão
        double loss_left = RecursiveDeygout(profile, start_idx,
max_idx, h_start, profile[max_idx].elevation);

```

```

        double loss_right = RecursiveDeygout(profile, max_idx,
end_idx, profile[max_idx].elevation, h_end);

        return loss_main + loss_curv + loss_left + loss_right;
    }
};

```

### 4.3 MATLAB: Integração com Toolboxes

Para usuários de MATLAB, a abordagem recomendada é utilizar o Antenna Toolbox e o Mapping Toolbox para a gestão de dados geográficos, integrando scripts personalizados para a lógica de Assis.

- **P.1546:** Utilizar a função `propagationModel` introduzida nas versões recentes, que já suporta modelos ITU. Caso não disponível, o script `P1546FieldStrMixed.m` do repositório *GitHub - eeveetza/p1546* é a alternativa robusta.
- **Deygout:** O MATLAB não possui um "built-in" para Deygout com Assis. O engenheiro deve escrever a função recursiva (similar à lógica Python acima), mas tirando proveito das operações matriciais do MATLAB:

```

% Exemplo de vetorização em MATLAB para cálculo de Nu
D1 = distances - distances(1);
D2 = distances(end) - distances;
LOS = tx_h + (rx_h - tx_h).*(D1./ total_dist);
H_obs = terrain_profile - LOS;
Nu = H_obs.* sqrt(2 * (D1 + D2)./(lambda * D1.* D2));
[max_nu, idx] = max(Nu);

```

## 5. Regulação da ANATEL e o Sistema Mosaico

A implementação correta desses algoritmos visa, em última instância, a aprovação regulatória. O sistema **Mosaico** da Anatel impõe formatos rígidos e critérios de proteção que o software deve respeitar.

### 5.1 O Ecossistema Normativo

A **Resolução nº 721/2020** revogou regulamentos antigos e consolidou a estrutura técnica de radiodifusão. Ela é complementada por Atos de Requisitos Técnicos específicos:

- **Ato nº 9751 (TV Digital - SBTVD-T):** Define os parâmetros para TV Digital (ISDB-Tb). Revogou o Ato 3114.
- **Ato nº 3115/8104 (FM):** Define os requisitos para Radiodifusão Sonora em Frequência Modulada.

### 5.2 Relações de Proteção (D/U)

Um software de propagação deve verificar automaticamente se o sinal desejado (D) supera o sinal indesejado (U) pelas margens (Relações de Proteção) especificadas nas tabelas da

Anatel.

### 5.2.1 TV Digital (Ato nº 9751)

As relações de proteção variam drasticamente dependendo da natureza do interferente (Analogico ou Digital). Para o planejamento da TV Digital no Brasil, as tabelas críticas são :

**Tabela 1: Relações de Proteção D/U para TV Digital (Co-canal e Adjacente)**

| Cenário de Interferência<br>(Interferente \rightarrow Vítima) | Co-canal (N) | Adjacente Inferior (N-1) | Adjacente Superior (N+1) |
|---|--------------|--------------------------|--------------------------|
| Digital \rightarrow Digital                                   | +19 dB       | -36 dB                   | -36 dB                   |
| Analogico \rightarrow Digital                                 | +7 dB        | -31 dB                   | -31 dB                   |
| Digital \rightarrow Analogico                                 | +34 dB       | -11 dB                   | -11 dB                   |

*Insight Técnico:* Note a robustez do sinal digital contra interferência analógica (exige apenas 7 dB de proteção co-canal), contrastando com a fragilidade do sinal analógico, que exige 34 dB de proteção contra um sinal digital. Isso explica a agressividade com que a TV Digital pode ser implantada em canais adjacentes, mas o cuidado extremo necessário ao planejar canais digitais próximos a legados analógicos.

### 5.2.2 FM (Ato nº 3115)

Para FM, a proteção considera até o segundo canal adjacente (devido à largura de banda de 200 kHz e o desvio de frequência).

**Tabela 2: Relações de Proteção D/U para FM**

| Separação de Frequência    | Relação de Proteção (D/U) |
|----------------------------|---------------------------|
| Co-canal (0 kHz)           | 28 a 30 dB                |
| 1º Adjacente (\pm 200 kHz) | 6 dB                      |
| 2º Adjacente (\pm 400 kHz) | -40 dB                    |

## 5.3 Contornos Protegidos e Arquivos de Upload

Para submeter um projeto ao Mosaico, o engenheiro deve calcular o **Contorno Protegido**.

- **Definição:** É o lugar geométrico onde a intensidade de campo atinge o valor mínimo exigido (ex: 66 dBµV/m para FM Classe A, 51 dBµV/m para TV Digital UHF).
- **Curvas:**
  - **Analogico:** Usa-se E(50,50) (50% tempo, 50% locais).
  - **Digital:** Usa-se E(50,90) (90% tempo, 50% locais). A fórmula de conversão usual é  $E(50,90) = E(50,50) - (E(50,10) - E(50,50))$  ou interpolações diretas da P.1546.
- **Formato de Arquivo (.txt):** O Mosaico exige o upload dos pontos do contorno. O formato típico é um arquivo de texto simples contendo azimuth e distância, ou coordenadas geográficas.
  - **Padrão:** Azimutes de 0 a 355 graus (passo de 5 graus).
  - **Datum:** **SIRGAS 2000** (Obrigatório). O uso de WGS-84 ou SAD-69 gerará erros de validação posicional.

- **Formato TXT:** Geralmente colunas delimitadas: AZIMUTE; DISTANCIA\_KM ou LAT; LON.

## 6. Conclusão

A implementação de ferramentas para cálculos de propagação no Brasil exige uma abordagem híbrida. O uso da **ITU-R P.1546** é mandatório para a definição legal da cobertura (contornos protegidos) e obediência aos ritos da Anatel. Entretanto, a topografia brasileira impõe o uso de métodos determinísticos como **Deygout com correção de Assis** para garantir que a cobertura teórica se traduza em recepção real e para resolver disputas de interferência em áreas de sombra.

Para o desenvolvedor, a escolha da linguagem (Python para agilidade, C++ para volume de dados) deve ser guiada pela escala do projeto. Contudo, a integridade dos dados de entrada (MDE confiável, Datum SIRGAS 2000) e a rigorosa adesão às tabelas de proteção dos Atos nº 9751 e 3115 são os fatores determinantes para o sucesso de qualquer projeto de engenharia de radiodifusão submetido ao sistema Mosaico.

## Referências citadas

1. Ato nº 915, de 01 de fevereiro de 2024 - Anatel, <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2024/1920-ato-915>
2. P.1546 : Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz - ITU, <https://www.itu.int/rec/r-rec-p.1546>
3. eeveetza/Py1546: Python Implementation of Recommendation ITU-R P.1546 - GitHub, <https://github.com/eeveetza/Py1546>
4. eeveetza/p1546: MATLAB/Octave Implementation of Recommendation ITU-R P.1546, <https://github.com/eeveetza/p1546>
5. itur · PyPI, <https://pypi.org/project/itur/>
6. Comportamento de modelos de difração sobre múltiplos gumes de faca em VHF e UHF - Biblioteca da SBRt, <https://biblioteca.sbrt.org.br/articlefile/1197.pdf>
7. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ..., [https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/10575/dissertacao\\_andre\\_vinicius.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/10575/dissertacao_andre_vinicius.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
8. Propagation over irregular terrain with and without vegetation - ITU, [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.1145-1990-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.1145-1990-PDF-E.pdf)
9. Diffraction loss - Wireless Communication, <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/diffrac.htm>
10. Field testing diffraction - CloudRF, <https://cloudrf.com/field-testing-diffraction/>
11. MANUAL – Propagación de las ondas radioeléctricas en sistemas terrenales móviles terrestres en las bandas de ondas métricas/decimétricas - ITU, [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-44-2002-OAS-MSW-S.doc](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-44-2002-OAS-MSW-S.doc)
12. P.526-5 - Propagation by diffraction - ITU, [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-5-199708-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-5-199708-S!!PDF-E.pdf)
13. 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](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-11-200910-S%21%21PDF-E.pdf)
14. Resolução nº 721, de 11 de fevereiro de 2020 - Anatel, <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2020/1383-resolucao-721>
15. 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>
16. Ato nº 3115, de 10 de junho de 2020 (REVOGADO) - Anatel, <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/>

2020/1491-ato-3115 17. 2022 - Anatel,

<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/>

2022 18. Manual de Mapeamento Simplificado para Identificação Preliminar e Priorização de Talvegues Suscetíveis à Ocorrência,

[https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/2025\\_12\\_08\\_Manual\\_2ed\\_v\\_preliminar.pdf](https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/2025_12_08_Manual_2ed_v_preliminar.pdf)