



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

Interferências entre Centrais Geradoras Eólicas
Uma Abordagem Regulatória

Geraldo Faria de Souza Neto

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS - CCS

DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO

Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos
Setores Energético e Mineral

Brasília, março de 2017.



Geraldo Faria de Souza Neto

Interferência entre Centrais Geradoras Eólicas
Uma Abordagem Regulatória

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral, apresentada ao programa de pós-graduação lato sensu em Administração da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de especialista em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral.

Orientador: Leonardo Lima Gomes

Brasília
Março de 2017.

Agradecimentos

À minha esposa, Walquíria de Jesus Teixeira, que deu o suporte necessário para que eu pudesse fazer essa especialização durante os finais de semana.

Aos colegas de trabalho Enio Ribeiro Salles, que escreveu o embrião da solução proposta nesse Trabalho, Guilherme Vieta Junqueira e Marcus Vinícius Coelho Vieira da Costa pela cooperação na análise e teste dos *scripts* na linguagem Python.

À Agência Nacional de Energia Elétrica e a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pelo apoio institucional necessário para a execução dessa especialização.

Resumo

Souza, Geraldo. Lima, Leonardo. Interferência entre Centrais Geradoras Eólicas - Uma Abordagem Regulatória. Brasília, 2017. Número de páginas p.42 Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral – Departamento de Administração. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A partir do ano de 2009, com a edição de um leilão exclusivo e publicação da Resolução Normativa 391/2009, o Brasil deu uma guinada positiva na curva de instalação de centrais geradoras eólicas, culminando com resultados impressionantes como a energia elétrica oriunda dessa fonte correspondeu a mais de 5% do consumo brasileiro em 2016, crescimento acumulado de 106% nos últimos 24 meses e a colocação do país entre os dez maiores mercados mundiais. Quanto mais a exploração desse tipo de fonte cresce, mais importante se torna a determinação da região de interferência regulatória estabelecida na norma para essas centrais geradoras. Assim, este trabalho tem o intuito de criar uma solução para a representação gráfica georreferenciada dessa interferência regulatória via programação.

Palavras-chave

Fontes Renováveis, Energia Eólica, Efeito Esteira, Regulação, Python, Arcmap

Abstract

Souza, Geraldo. Lima, Leonardo. Interferência entre Centrais Geradoras Eólicas - Uma Abordagem Regulatória. Brasília, 2017. Número de páginas p.42 Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral – Departamento de Administração. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Initiating in 2009, with the publication of an exclusive auction and the Normative Resolution 391/2009, Brazil has taken a positive turn in the curve of wind power plants installation, achieving impressive results as the electric energy from this source reached more than 5% of Brazilian consumption in 2016, accumulated growth in the last 24 months of 106% and the placement of the country among the ten largest world markets. As the exploration of this type of source grows, more important is the determination of the regulatory interference region established in the normative resolution for these generating plants. Thus, this work intends to create a solution for the georeferenced graphical representation of this regulatory interference through programming.

Key-words

Renewable Sources, Wind Power, Wake Effect, Regulation, Python, Arcmap.

Sumário

1. O Problema	9
1.1. Introdução	9
1.2. Objetivo	10
1.3. Delimitação do Estudo	10
1.4. Relevância do Estudo	10
2. Referencial Teórico	13
2.1. Funcionamento do Setor de Energia Elétrica Brasileiro	13
2.2. A Energia Eólica no Contexto Mundial	14
2.3. A Energia Eólica no Contexto Brasileiro	16
2.4. Características de uma Central Geradora Eólica	19
2.4.1. O Recurso Eólico	19
2.4.2. O Aerogerador	22
2.4.3. Interferência entre Centrais Geradoras Eólicas	23
2.5. Sistema de Informação Georreferenciada – SIG	24
3. Proposta de Solução para o Problema	26
3.1. Metodologia	26
3.2. Determinação das Características da EOL TCC	26
3.3. Lógica da Programação	27
3.4. Imprecisão do Método Proposto	29
3.5. Implementação	30
3.6. Determinação das Características da EOL TCC	31
4. Resultados	35
4.1. Imagem Georreferenciada da RI Regulatória da EOL TCC.	35
5. Conclusão	38
5.1. Considerações Finais	38
5.2. Sugestões de Melhorias	38
6. Bibliografia	39
APÊNDICE – A Codificação	41

Lista de figuras

Figura 1 – Evolução do Consumo Mundial de Energia Primária	15
Figura 2 – Evolução da Capacidade Instalada de Geração Eólica Mundial	16
Figura 3 – Evolução do Parque Gerador Brasileiro	17
Figura 4 – Quantidade e Capacidade das Eólicas em Operação no Brasil	18
Figura 5 – Item Potencial Eólico do Sumário de Certificação da REN 391/2009	21
Figura 6 - Determinação do Ângulo de Incidência	21
Figura 7 – Regiões de Incidência e de Interferência de um Aerogerador	22
Figura 8 – Dados Relativos ao Aerogerador, Ficha Técnica da REN 391/2009	23
Figura 9 – Componentes de um Aerogerador	23
Figura 10 – Divisão do Ângulo de Interferência	28
Figura 11 – Imprecisão do Método	30
Figura 12 – Implementação do Script	31
Figura 13 – Interface Gráfica do Script	31
Figura 14 – Aerogeradores da EOL TCC e Direção Resultante do Vento	33
Figura 15 - Aerogeradores da EOL TCC Georreferenciados	34
Figura 16 – Inserção de Dados no Script	35
Figura 17 – RI Regulatória por Aerogerador da EOL TCC	36
Figura 18 – RI Regulatória da EOL TCC	36
Figura 19 – RI Regulatória Georreferenciada da EOL TCC	37

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Evolução do Parque Eólico Brasileiro	11
Tabela 2 - Quantidade de Centrais Eólicas em Operação por Estado	12
Tabela 3 - Dados do PROINFA	17
Tabela 4 - Centrais Eólicas Outorgadas que Não Estão em Operação	19
Tabela 5 – Equivalência entre Ângulo Azimutal e Trigonométrico	27
Tabela 6 – Direção e Frequência dos Ventos do Estado da Bahia ano de 2013	31
Tabela 7 – Direção e Frequência dos Ventos do Estado da Bahia ano de 2014	32
Tabela 8 – Direção e Frequência dos Ventos do Estado da Bahia ano de 2015	32
Tabela 9 – Atributos dos Aerogeradores da EOL TCC	33

Lista de Equações

Equação 1– Relação Matemática entre Ângulos de Incidência e de Interferência....	27
Equação 2– Relação Matemática entre Ângulos Azimutal e Trigonométrico	28
Equação 3 – Cálculo da Coordenada Leste do Ponto E	29
Equação 4 – Cálculo da Coordenada Oeste do Ponto E	29

1. O Problema

1.1. Introdução

Energia elétrica é um insumo de grande importância para a humanidade, tanto que seu advento causou uma revolução nos processos fabris e bem-estar geral das populações. Essa forma de energia nobre pode ser obtida por meio da transformação de outros tipos de energia, tais como, cinética, química e potencial gravitacional.

De maneira global, a fonte de energia mais utilizada para a produção de energia elétrica tem o carvão como combustível. Ocorre que, a queima desse insumo pode gerar vários tipos de poluição, desde chuva ácida até aumento dos gases de efeito estufa. É nesse contexto que a energia elétrica proveniente de fontes renováveis se encaixa, pois estas possuem a característica de serem menos danosas ao meio ambiente. De modo geral, as nações têm buscado diminuir a sua dependência de carbono por meio da adoção dessas fontes.

No Brasil, a produção de energia elétrica é atividade regulada pelo Estado, o qual por meio de concessão ou autorização, outorga ao interessado o direito de implantar e explorar centrais geradoras de energia elétrica. Embora contasse com uma matriz de geração de energia elétrica predominantemente hidráulica, o governo brasileiro seguiu a tendência mundial e, começou a fomentar a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis por meio de programas, como o Programa de Incentivo às Fontes Renováveis (PROINFA)¹, vantagens fiscais, leilões de contratação de energia elétrica de fontes alternativas exclusivos por fonte ou não, além da criação de Resoluções Normativas (REN) específicas para essas fontes. Esses incentivos impulsionaram sobremaneira o crescimento do setor eólico brasileiro que passou de 7 centrais geradoras eólicas (EOL) em operação e 0,22 GW de capacidade instalada em 2002, ano de lançamento do PROINFA, para 413 EOL em operação e 10.168 GW de capacidade instalada, em 2016, perfazendo mais de 6,5 % da capacidade instalada do parque gerador brasileiro. De fato, esse é um dos

¹ Esse programa incentivou a implantação das seguintes fontes de energia renovável: hidrelétrica com características de Pequena Central Hidrelétrica (PCH), usinas termelétricas (UTE) utilizando biomassa como combustível e centrais geradoras eólicas (EOL).

setores que mais se desenvolveu no país, acumulando 106% de crescimento nos últimos em 24 meses, colocando-o, em meados de 2016, entre os dez maiores mercados mundiais desse tipo de geração.

A competência de regulamentar a outorga para implantação de EOL foi delegada pelo Estado à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual normatizou essa atividade por meio da edição da REN nº 391, de 15 de dezembro de 2009 (REN 391/2009). Essa resolução define a região de interferência (RI) entre parques eólicos como sendo a região que dista de 20 vezes a altura máxima da pá, considerando-se todas as direções do vento com permanência superior a 10%.

1.2. Objetivo

Este trabalho almeja criar uma representação gráfica georreferenciada da RI descrita pela REN 391/2009. Para tanto, será criada uma série de instruções computacionais, *scripts*, que funcionarão como um roteiro cujo produto final será uma figura georreferenciada que simbolizará a RI regulatória da EOL.

1.3. Delimitação do Estudo

Considerando que a ANEEL detém licença de uso do *software* Arcgis da empresa ESRI, o produto final desse trabalho, o *script*, será escrito na linguagem denominada de Python a qual pode ser lida nativamente pelo *software* Arcgis.

O *script* estará circunscrito à representação gráfica georreferenciada da RI de uma EOL definida pela REN 391/2009, ou seja, tal qual a citada norma, não levará em consideração fatores importantes, como rugosidade, orografia do terreno e altitude do aerogerador, que podem modificar essa área de interferência.

1.4. Relevância do Estudo

Sobre a questão de interferência entre parques eólicos é importante destacar a evolução de um regramento de incentivo fiscal criado para usinas hidrelétricas com características de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), Centrais Termelétricas (UTE) utilizando biomassa como combustível e EOL que teve início na

segunda metade de 2003, por meio da edição da Lei nº 10.762², a qual estabeleceu desconto mínimo de 50% a ser aplicado às tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição (TUST e CUSD), incidindo na produção e no consumo da energia comercializada por empreendimentos que atendessem a citada classificação e que tivessem uma potência instalada igual ou menor do que 30.000 kW, posteriormente, em 2004 a condição necessária passou de 30.000 kW de potência instalada para 30.000 kW de potência injetada e no final de 2015 passou para 300.000 kW de potência Injetada com a publicação da Lei nº 13.203. Esses subsídios e suas alterações foram implementados pela ANEEL por meio da edição e atualização da REN 77/2004. Conforme será demonstrado nas tabelas a seguir, esse período de 12 anos, segunda metade de 2004 até segunda metade de 2016, induziu as empresas interessadas na geração eólica a modular seus complexos em centrais geradoras menores com capacidade instalada inferior a 30.000 kW. Esse fatiamento dessas centrais eólicas levou ao povoamento de regiões com várias usinas, nem sempre pertencentes ao mesmo grupo econômico.

Tabela 1 - Evolução do Parque Eólico Brasileiro

Ano	Quantidade de EOL instalada por Ano	Capacidade Instalada total (kW)	Capacidade Instalada Média (KW)	
Até 2005	8	27.106	3.388	
2006	5	208.300	41.660	
2007	1	10.200	10.200	
2008	6	95.823	15.971	
2009	15	264.830	17.655	
2010	14	326.800	23.343	
2011	22	602.650	27.393	
2012	16	368.448	23.028	
2013	14	345.192	24.657	
2014	108	2.774.224	25.687	
2015	107	2.652.775	24.792	
2016	97	2.492.390	25.695	
Total	413	10.168.738	Média Geral	24.622
* Entre final de 2004 até início de 2006 não foi instalada nenhuma EOL				

Fonte: Própria com dados do Banco de Informações de Geração (BIG), ANEEL

² Essa Lei resultou na REN nº 77, de 18.8.2004 a qual estabeleceu os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos com características de PCH e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada.

Tabela 2 - Quantidade de Centrais Eólicas em Operação por Estado

Unidade da Federação	Número de Municípios	Número de EOL em Operação em 2016	Capacidade Instalada (kW)	
			Total	Média
RN	19	122	3.311.556	27.144
RS	10	70	1.896.367	27.091
BA	10	68	1.750.140	25.737
CE	14	57	1.544.264	27.092
PI	5	32	885.200	27.663
PE	10	30	652.885	24.763
SC	3	15	242.500	16.167
PB	2	13	69.000	5.308
Total	73	407	10.351.911	Média Geral 25.435

Fonte: Própria com dados do BIG, ANEEL

Afora os incentivos fiscais, existem outras características do arcabouço regulatório brasileiro que tornam a análise da RI definida na REN 391/2009 crítica, são elas:

- I) O passo inicial para se conseguir uma autorização para implantar e explorar uma EOL se dá por meio da emissão do Despacho de Registro de Requerimento de Outorga – (DRO). Conforme será explicado neste trabalho, o documento serve como “pontapé burocrático” tanto para centrais que terão a sua energia comercializada no Ambiente de Contratação Livre ou Regulado, acarretando um grande número de exames de pedidos de DRO por parte da ANEEL.
- II) Muitas empresas solicitam alterações de características técnicas de suas centrais geradoras as quais afetam as respectivas RI levando a análises e reanálises.

A importância da geração eólica no Brasil continuará a crescer, como antevê Moreira (2016, p. 19) “[...] prevê-se que a capacidade instalada de empreendimentos eólicos no país dobrará nos próximos três anos, quando os atuais parques autorizados e em construção iniciarem sua operação comercial.” Esse fato aliado as características do setor de energia eólica brasileiro demonstram que uma representação gráfica georreferenciada da RI regulatória de uma EOL não só aumentaria e muito a velocidade de análise por parte dos servidores da ANEEL como também a tornaria mais segura e confiável.

2. Referencial Teórico

2.1. Funcionamento do Setor de Energia Elétrica Brasileiro

O Brasil passou por grandes modificações nas políticas que regem o setor elétrico. Em seus primeiros passos, final do século XIX e início do XX, conforme relata Leite (2014), o setor era pouco regulamentado e suas atividades, geração, transmissão e distribuição, em sua maioria, desenvolvidas por empresas privadas. Conforme o século XX progredia, crescia também a estatização do modelo, por meio da edição de regulamentos, planejamento centralizado e atuação do Estado como agente econômico. Esse paradigma foi rompido, no final do século XX e início do XXI, com a saída parcial do Estado como agente econômico e a assunção de um mais regulador por parte deste.

Embora tenham ocorrido algumas reformas, e uma maior intervenção do Estado, o último modelo, implantado por volta de 2002, é o que está vigente. Esse paradigma possui características dentre as quais se destaca: menor participação do Estado como agente econômico, empresas desverticalizadas, planejamento centralizado, agência reguladora, Operador Nacional do Sistema (ONS), Sistema Interligado Nacional (SIN), Sistema Isolado (SI), Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), Ambiente de Contratação Livre (ACL), Ambiente de Contratação Regulado (ACR), Consumidor Livre (LEITE, 2014).

Para a melhor compreensão deste trabalho, serão descritas apenas as características do modelo atual do setor elétrico que forem pertinentes à análise que se pretende construir.

Existem dois mercados para o comércio de energia elétrica no Brasil, Ambiente de Contratação Livre (ACL) e Ambiente de Contratação Regulado (ACR), no primeiro, o gerador pode vender a sua energia para qualquer Consumidor Livre³, concretizando o negócio por meio de um contrato bilateral, ao passo que no segundo

³ Consumidor Livre é aquele que tem o direito de contratar seu fornecimento de energia elétrica de qualquer fornecedor negociando livremente seu preço. Esse tipo de consumidor, também, tem a obrigação de ter toda a sua demanda de energia elétrica lastrada por contratos. Se tornar livre é uma opção do consumidor, desde que sejam satisfeitos os critérios estabelecidos na Lei nº 9.648/1998.

o gerador é obrigado a participar de um Leilão para contratação de energia elétrica, o qual tem a finalidade de suprir a demanda futura das distribuidoras que, devido ao modelo vigente, são obrigadas a contratar toda a demanda de energia futura para o seu mercado cativo⁴ nesses leilões. Nesse caso, os contratos são padronizados e publicados juntamente com os editais dos respectivos certames. Nos dois ambientes, os contratos devem ser encaminhados para a CCEE. A ANEEL⁵ é o órgão de estado que tem a atribuição de promover esses certames, além de autorizar centrais geradoras de energia elétrica e regular o setor (LEITE, 2014).

2.2. A Energia Eólica no Contexto Mundial

Energia é uma matéria prima de grande importância para o desenvolvimento e manutenção da humanidade como conhecemos hoje, seu consumo aumentou juntamente com o crescimento populacional e o progresso da sociedade. A Figura a seguir, ilustra a evolução e previsão do consumo de energia primária por fonte:

⁴ Mercado cativo é composto por consumidores cativos que ou não atendem critérios para se tornarem livres ou optaram por não o ser. Assim, esses consumidores são obrigados a comprar sua energia elétrica da Distribuidora a qual estão conectados, pagando a energia consumida por meio de tarifa.

⁵ A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia, foi criada para regular o setor elétrico brasileiro, por meio da Lei nº 9.427/1996 e do Decreto nº 2.335/1997.

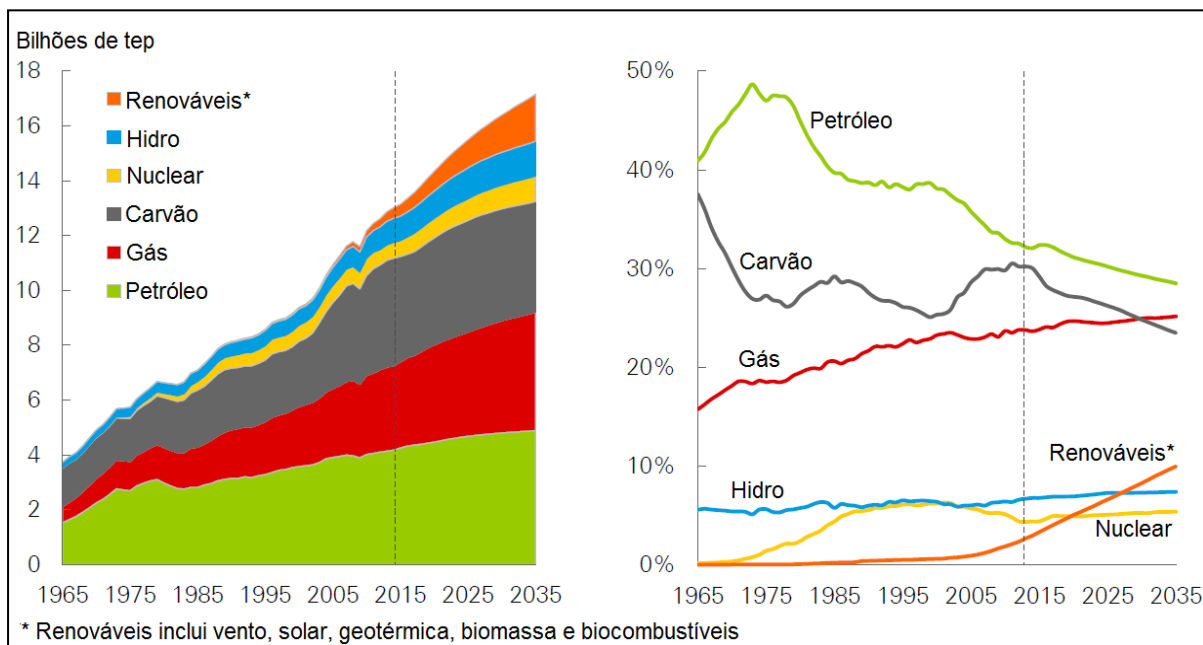


Figura 1 – Evolução do Consumo Mundial de Energia Primária

Fonte: BP Energy Outlook – 2017 Edition

Esse insumo pode ser agrupado conforme a possibilidade de seu esgotamento a longo prazo em renováveis e não renováveis. Por esse critério, as fontes de energia primária não renováveis são petróleo, carvão e gás natural, os quais também são denominados de combustíveis fósseis, ao passo que a hidráulica, eólica, solar, geotérmica, biomassa e biocombustíveis correspondem as renováveis.

A captação e o uso da energia trazem danos ao meio ambiente, especialmente no caso dos combustíveis fósseis, pela emissão de gases de efeito estufa cujas consequências ambientais são objeto de grande preocupação. Em posição singular se situa a energia nuclear, em teoria ilimitada, cujo uso não provoca danos imediatos ao meio ambiente, mas que é inseparável de riscos acidentais de proporções catastróficas e envolve um problema ainda não resolvido da destinação dos rejeitos radioativos (LEITE, 2014, p.36).

O temor mundial em torno do tema de mudanças climáticas devido aos gases de efeito estufa se deu inicialmente por meio de convenções como a Eco92, realizada em 1992 no Rio de Janeiro, culminando com a assinatura de acordos de redução de emissões de gases de efeito estufa, como o Acordo de Paris, realizado em 2016, cujo Brasil é signatário.

Essa preocupação pode ser acompanhada na Figura 1, na qual observa-se que atualmente estamos vivendo uma transição da matriz energética, com a

expectativa da diminuição da participação do petróleo e carvão e aumento da presença do gás e das energias renováveis no portfólio de fontes de energia primária.

Uma vez que o setor de geração de energia elétrica representa quase dois terços de toda a emissão de gases de efeito estufa devido a atividade humana (World Energy Outlook Special Report 2015 – Energy and Climate Change, p. 20), as Nações voltaram sua atenção para esse setor e, com o intuito de diminuir sua dependência de carbono, começaram a fomentar a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Esse incentivo levou a um grande crescimento desse tipo de geração, dentre as quais, destaca-se a conversão da energia cinética do ar em energia elétrica, cuja capacidade mundial atingiu, no final de junho de 2016, 456.486 MW, correspondente a 4,7% da demanda por energia elétrica (Half-year Report World Wind Energy Association (WWEA) 2016, p. 02). A evolução dessa fonte de energia é retratada pela figura a seguir:

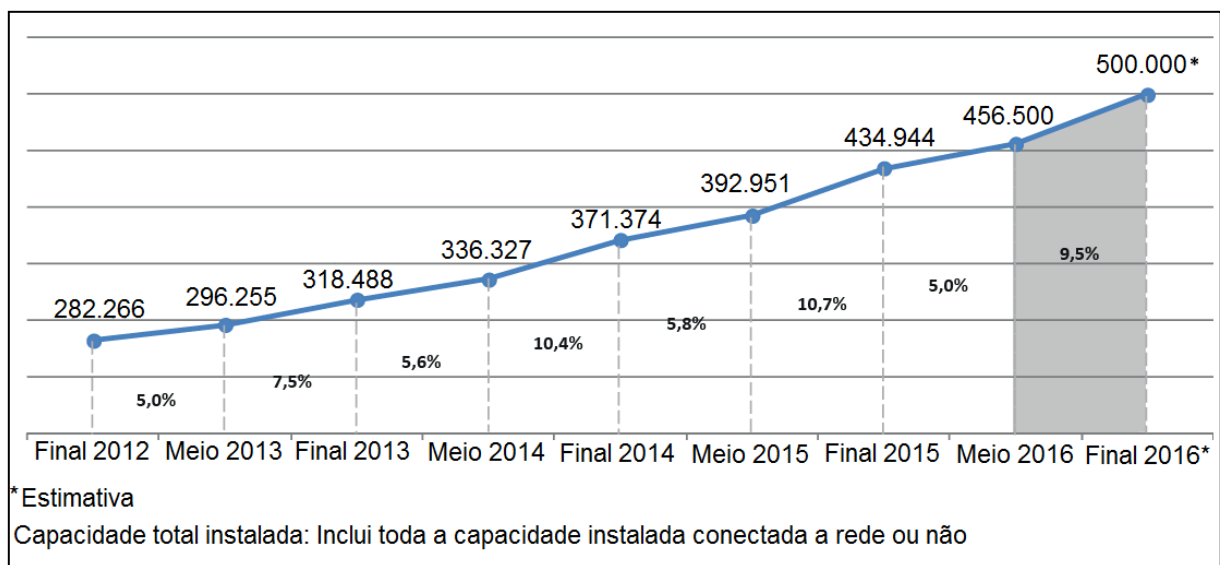


Figura 2 – Evolução da Capacidade Instalada de Geração Eólica Mundial

Fonte: Half-year Report World Wind Energy Association (WWEA) 2016

2.3. A Energia Eólica no Contexto Brasileiro

Embora contasse com uma matriz energética limpa, com mais de 70% de geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, o Brasil não ficou alheio às mudanças ocorridas no cenário mundial. Assim, com o intuito de incentivar a implantação de geração de energia elétrica com fontes alternativas e levando em

consideração que, segundo a Constituição Federal de 1988, a produção de energia elétrica é atividade regulada pelo Estado, Poder Concedente, o qual por meio de concessão ou autorização, outorga ao interessado o direito de implantar e explorar as centrais geradoras de energia elétrica, foi promulgada a Lei nº 10.438/2002, a qual criou o PROINFA. A figura e tabela a seguir ilustram a situação do parque gerador brasileiro em 2002 e as informações totais relativas ao citado Programa.

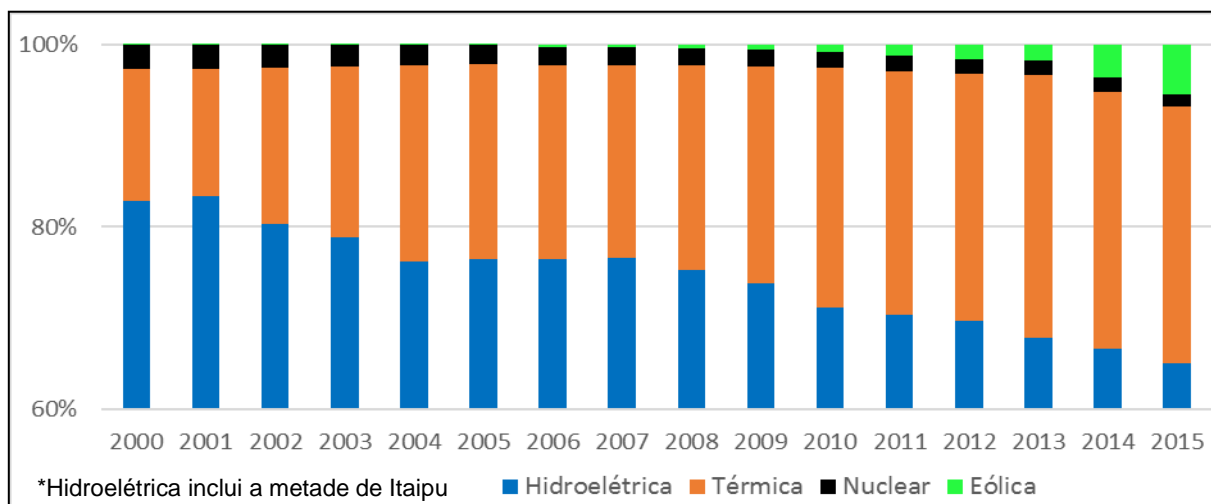


Figura 3 – Evolução do Parque Gerador Brasileiro

Fonte: Própria com dados do Balanço Energético Nacional 2016, da EPE

Tabela 3 - Dados do PROINFA

Tipo de Central Geradora	Número de Usinas	Capacidade instalada (MW)
Pequena Central Hidrelétrica – PCH	59	1.152,54
Central Geradora Eólica - EOL	41	963,99
Central Geradora Termelétrica - UTE	19	533,34
Total	119	2.649,87

Fonte: Própria com dados da Eletrobrás.

O ano de 2009 foi um divisor de águas para a fonte eólica, pois em 30 de março de 2009, por meio da Portaria nº 147, o Ministério de Minas e Energia (MME) determinou à ANEEL que promovesse, no ano de 2009, um Leilão para contratação de energia de reserva proveniente de fonte eólica. Esse certame foi o Leilão 003/2009 (Leilão de Energia de Reserva – Fonte Eólica), realizado em 14 de dezembro de 2009, com suprimento a partir de 1º de julho de 2012. Naquela ocasião, fora comercializada energia oriunda de 71 centrais geradoras novas,

correspondente a uma potência instalada total de 1.805,7 MW e 753 MWmédios⁶, além de um montante financeiro de R\$ 19.590.109.531,20 (dezenove bilhões, quinhentos e noventa milhões, cento e nove mil, quinhentos e trinta e um reais e vinte centavos). Após esse leilão inaugural ocorreram outros exclusivos e não exclusivos.

Também, naquele ano, foi publicado pela ANEEL, um regramento exclusivo para fonte eólica, a REN 391/2009, que estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de usinas eólicas, os procedimentos para registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida. Desta forma, com leilões e regramento próprio, a geração de energia eólica no Brasil apresenta um grande crescimento e penetração no setor elétrico, conforme é apresentado na figura a seguir:

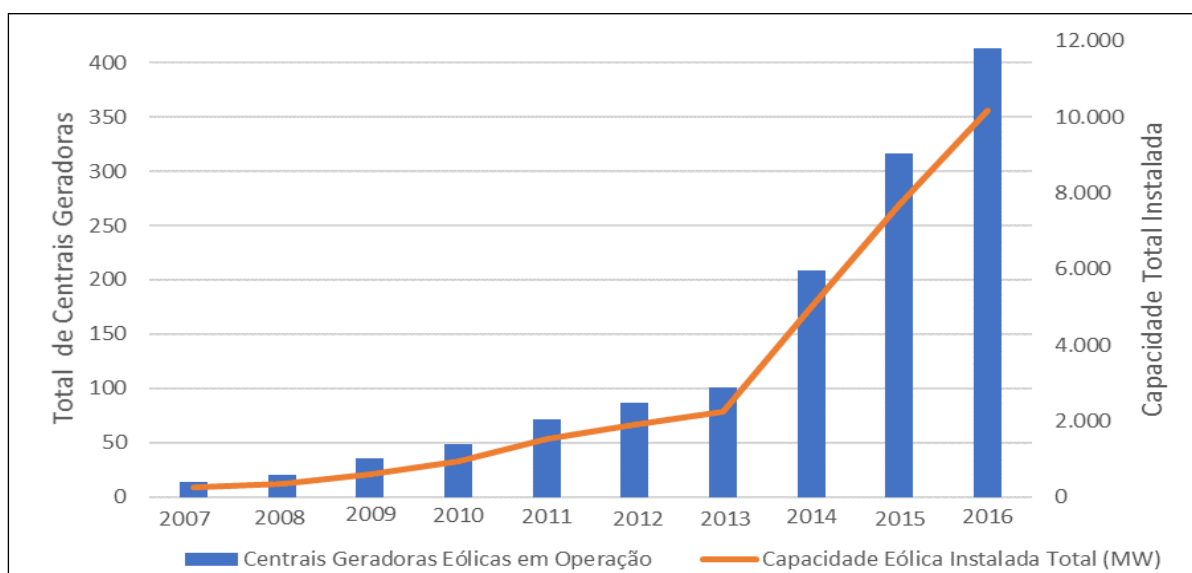


Figura 4 – Quantidade e Capacidade das Eólicas em Operação no Brasil

Fonte: Própria com dados do BIG, ANEEL

Segundo informações da página do ONS, em 2016, as centrais geradoras eólicas forneceram 30.812 GWh ao SIN, o que corresponde a 5,7% do total da energia elétrica consumida naquele ano.

Afora esse crescimento impressionante cabe ressaltar, conforme veremos na tabela a seguir, que estão fora dessa contabilização um potencial total em torno

⁶ A quantidade de energia que uma central geradora pode comercializar é denominada de Garantia Física, calculada pelo MME, cuja dimensão é medida em MWmédios.

de 7,7 GW de capacidade instalada distribuída entre EOL que já foram outorgadas, mas que já iniciaram obras e as que não começaram a implantação.

Tabela 4 - Centrais Eólicas Outorgadas que Não Estão em Operação

Condição da EOL Outorgada	Número de EOL	Potência Outorgada (kW)
Em Construção	151	3.549.100
Construção não iniciada	181	4.159.320
Total	332	7.708.420

Fonte: Própria com dados do BIG, ANEEL

2.4. Características de uma Central Geradora Eólica

Conforme mencionado anteriormente, a REN 391/2009 define a RI entre EOL como sendo a região que dista de 20 vezes a altura máxima da pá, considerando-se todas as direções do vento com permanência superior a 10%. Assim, este tópico visa abordar somente os conceitos necessários para a construção da citada RI, quais sejam: o recurso eólico e as partes de um aerogerador.

2.4.1. O Recurso Eólico

A geração de energia elétrica a partir do vento possui dependência cúbica em relação a sua velocidade, tornando a compreensão de suas características determinante para a viabilidade do projeto, pois uma variação de 10% na velocidade do vento implicará em uma alteração de 33% na energia que pode ser extraída dele. Entretanto, a característica mais predominante desse insumo é a sua variabilidade, tanto geográfica como temporalmente (BURTON, et al, 2011).

Uma relação que merece destaque é a influência do terreno no comportamento do vento, pois as suas características topográficas e orográficas afetam a velocidade deste e, conseqüentemente, a produção de energia elétrica (CUSTÓDIO, 2014). As nuances do terreno podem resultar em locais, morros, montanhas ou vales alinhados com sua direção, que possuam maior velocidade de vento, ou lugares, lado a sotavento de montanhas ou vales abrigados, que tem seu fluxo retardado (BURTON, et al, 2011).

A rugosidade do terreno é a influência da superfície desse e dos obstáculos, resultando num retardo do vento próximo ao solo. Entretanto, nem todos os elementos topográficos contribuem para a rugosidade. Vegetações e construções são exemplos de rugosidade, enquanto que longos morros lisos, por exemplo, não são porque não provocam aumento da turbulência (CUSTÓDIO, 2014, p. 137).

A rugosidade do terreno de uma determinada superfície é definida pelo tamanho e distribuição dos elementos de rugosidade que a compõe e pode ser dividida, de acordo com a classificação de Troen e Pettensen (1989), da menos rugosa, classe 0, para a mais rugosa, classe 3. Um exemplo de classe 0 é a superfície da água, mares e lagos, já classe 3 são áreas urbanas e terras de fazendas com muito quebra-ventos (CUSTÓDIO, 2014).

Assim, a série temporal eólica é a principal característica a ser determinada. Esse estudo é feito por meio da instalação de torres de medição com instrumentos específicos para a quantificação de várias grandezas até mesmo variáveis não ligadas, diretamente, ao recurso eólico. Levando em consideração a grande sensibilidade em relação à velocidade do vento, é importante que essa medição seja suficientemente longa para obter dados confiáveis e representativos, pois a qualidade de uma campanha de medição pode facilitar até mesmo o acesso a financiamento para a implantação da própria central geradora (MOREIRA, 2016).

No entanto, uma campanha de medição de longo prazo inviabilizaria, comercialmente, a instalação da EOL. Na verdade, as medições são feitas por curto período de tempo e, posteriormente, correlacionada com outras campanhas de medições de maior duração, realizadas em outros locais (CUSTÓDIO, 2014).

Sobre esse tópico a REN 391/2009 estabelece que o tempo de medição deve ser de, no mínimo, três anos e que tanto a aquisição dos dados quanto a predição da produção energética devem ser certificados por empresa independente e, ainda, exige que as empresas interessadas nesse tipo de geração encaminhem o Sumário de Certificação, conforme modelo disponível na página da ANEEL. A figura abaixo representa a parte dessa certificação destinada a caracterização do recurso eólico do citado sumário.

3. POTENCIAL EÓLICO															
VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO (m/s):					MÁXIMA RAJADA DE VENTO LOCAL (m/s):					ALTURA DE MEDIÇÃO DO VENTO (m):					
FATOR DE FORMA DE WEIBULL k:								FATOR DE ESCALA DE WEIBULL c(m/s):							
DIREÇÕES DE VENTO COM PERMANÊNCIA SUPERIOR A 10%:															
N	NNE	NE	ENE	L	ESSE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO
INTENSIDADE DE TURBULÊNCIA (média anual):					INTENSIDADE DE TURBULÊNCIA MÁXIMA:					RUGOSIDADE MÉDIA DO TERRENO (z_0) (m):					
LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO ANEMOMÉTRICA ² :								LATITUDE:				LONGITUDE:			
TEMPO DE MEDIÇÃO LOCAL DO RECURSO EÓLICO (meses):															
PREVISÃO MENSAL DE PRODUÇÃO ENERGÉTICA:															
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ				
ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA ELÉTRICA (MWh/ano):								ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO MÉDIA (MWmed):							

Figura 5 – Item Potencial Eólico do Sumário de Certificação da REN 391/2009

Fonte: REN 391/2009, ANEEL

Voltando ao objetivo desse trabalho, na Figura 5, é possível adquirir direção de vento com permanência superior a 10%, a qual é necessária para a construção da RI regulatória. Ainda se percebe que temos uma rosa dos ventos com 16 pétalas sendo o Norte representado por 0° , com sentido positivo na direção horária e cada direção possui equivalência de $22,5^\circ$. Cabe ressaltar que as direções são fornecidas por meio de ângulos centrais. Dessa forma, faz-se necessária a reconstituição do ângulo de incidência.

O entendimento do ângulo de incidência do vento é fundamental para a construção da RI regulatória. A figura a seguir ilustra os cálculos necessários para um exemplo de direção predominante do vento Leste (L) – 90° e rosa dos ventos de 16 pétalas.

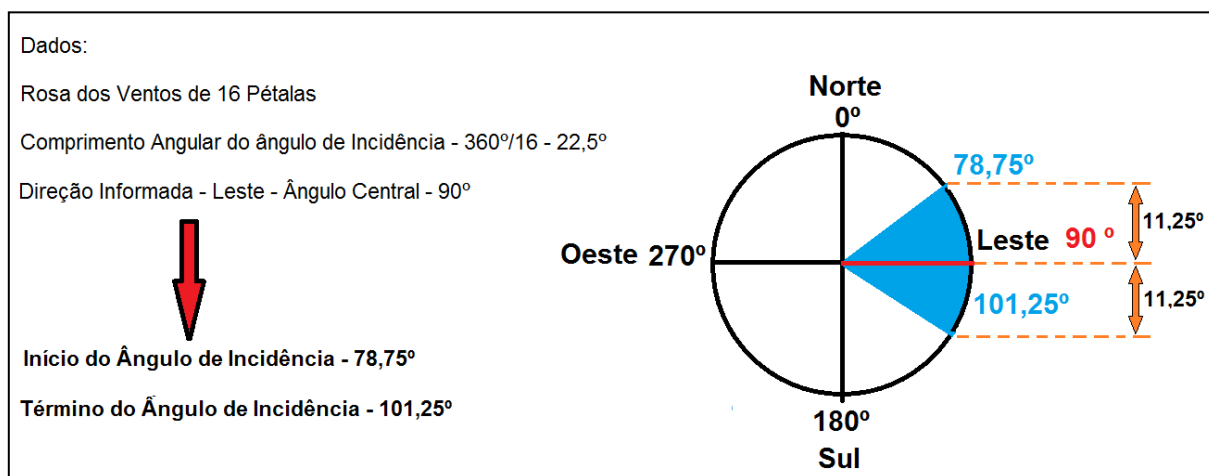


Figura 6 - Determinação do Ângulo de Incidência

Fonte: Própria

Para a regulação, o ângulo de incidência e o de interferência são explementares, ou seja, a diferença de suas medidas é igual a 180. A figura a seguir ilustra a interferência regulatória causada por um aerogerador

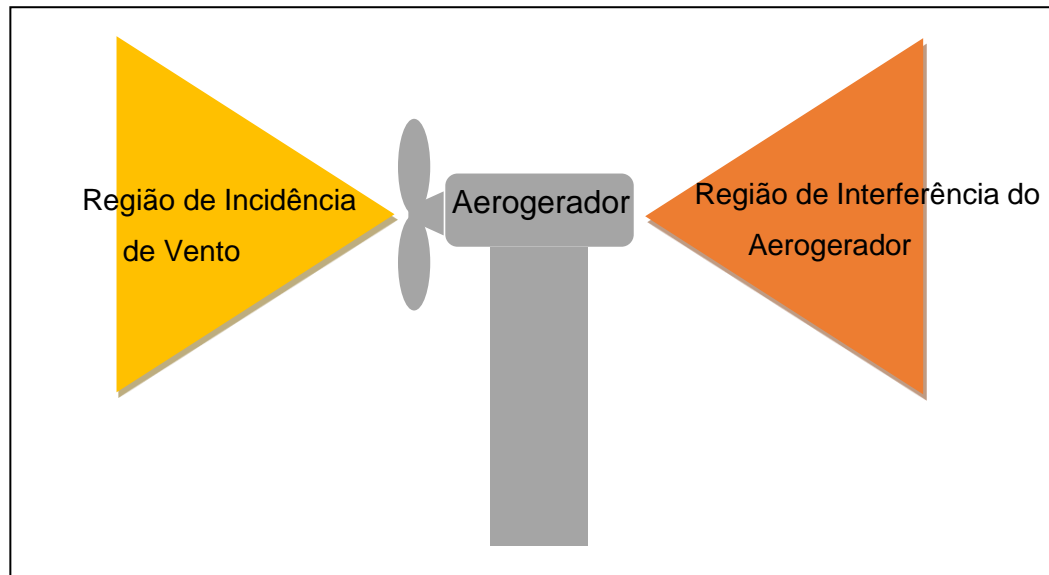


Figura 7 – Regiões de Incidência e de Interferência de um Aerogerador

Fonte: Própria, aplicação da REN 391/2009, ANEEL

2.4.2. O Aerogerador

A geração de energia eólica centralizada utiliza aerogeradores para transformar o vento, em energia elétrica. Essas máquinas são compostas pela turbina eólica, gerador de energia elétrica, além de outros equipamentos como transformadores, sistemas de controle e anemômetros. (CUSTÓDIO, 2014).

Para este trabalho, considerando que a RI regulatória tem um alcance de 20 vezes a altura máxima da pá, os componentes de um aerogerador que deveremos nos ater são torre, nacele (ou cubo do rotor) e diâmetro do rotor (duas vezes o tamanho da pá).

A REN 391/2009 determina o protocolo de uma Ficha Técnica da EOL, conforme modelo disponível na página eletrônica da ANEEL, esse documento possui várias tabelas dentre as quais destaca-se a intitulada de “8. Usina Eólica – EOL”, a qual possui espaços para o preenchimento de dados do rotor, e informações sobre a torre. As figuras a seguir compreendem essa parte da Ficha Técnica e os componentes do aerogerador que são importantes para este trabalho.

ROTOR AERODINÂMICO			
Diâmetro (m):	Área varrida (m ²):	Faixa de rotação (rpm):	Número de pás:
TORRES			
ALTURA DO EIXO DO ROTOR (m):	TIPO:	MATERIAL:	PESO (kgf):
Nível de ruído na base da torre (dB):	Referente à velocidade de vento de m/s		

Figura 8 – Dados Relativos ao Aerogerador, Ficha Técnica da REN 391/2009

Fonte: REN 391/2009, ANEEL

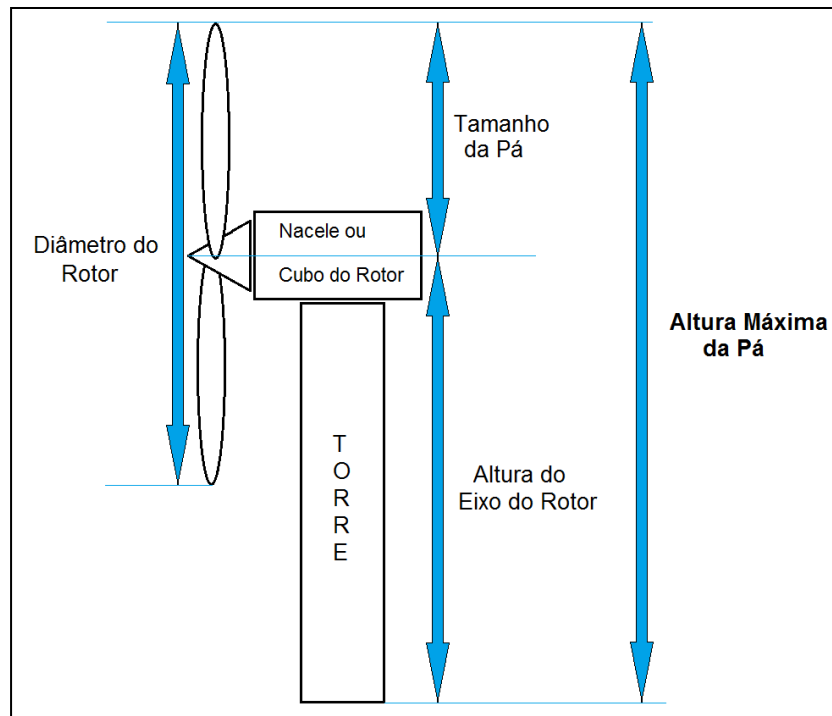


Figura 9 – Componentes de um Aerogerador

Fonte: Própria, aplicação da REN 391/2009, ANEEL

Com os dados das Figuras 8 e 9 consegue-se determinar a altura máxima da pá do aerogerador que é igual a altura do eixo do rotor acrescido com a metade do diâmetro do rotor.

2.4.3. Interferência entre Centrais Geradoras Eólicas

O vento sofre alterações após passar por uma turbina eólica, pois a extração de sua energia cinética e rotação das pás desta provocam uma redução de velocidade e um giro de massa de ar. Após uma certa distância, que pode ser relacionada com o diâmetro do rotor da turbina, o vento se recompõe. Essa região compreendida logo após a turbina eólica e a recomposição do vento é chamada de esteira (CUSTÓDIO, 2014).

Esse fenômeno, também, conhecido como efeito esteira, causa redução da potência de saída e aumento de esforços mecânicos sobre os aerogeradores que estiverem compreendidos em sua área. Seu estudo se subdivide em esteira próxima e distante, a primeira se localiza em torno de duas a quatro vezes o diâmetro do rotor, e a última após essa distância (GÖÇMEN, T. et al. 2016). A dissipação das influências do aerogerador sobre o vento depende da orografia e rugosidade do terreno, mas a distância de vinte vezes o diâmetro do rotor costuma ser o bastante para que o vento retorne a sua característica original (JAIN, 2016).

A REN 391/2009 não leva em consideração a orografia ou rugosidade do terreno e estipula a RI como sendo vinte vezes a altura máxima alcançada pela pá do rotor, área suficientemente grande para conter a região citada no parágrafo anterior.

2.5. Sistema de Informação Georreferenciada – SIG

Com o conhecimento acumulado até aqui, consegue-se calcular o raio da RI regulatória de um aerogerador. Ocorre que ainda é necessário que essa interferência seja colocada no mapa, georreferenciada, afim de que se verifique a interferência ente as centrais geradoras.

A REN 391/2009 estabelece em seu anexo I que os interessados em obter DRO ou Outorga autorizativa para implantar e explorar eólicas devem protocolar arquivos digitais vetoriais georreferenciados no formato estabelecido no sítio oficial da ANEEL. Os arquivos vetoriais representam o ambiente por meio de três formas fundamentais, ponto, linha ou polígono.

As estruturas vetoriais são utilizadas para representar as coordenadas das fronteiras de cada entidade geográfica, através de três formas básicas: pontos, linhas, e áreas (ou polígonos), definidas por suas coordenadas cartesianas (CÂMARA *et al*, 2005, p.33)

Desta forma, a norma requer que as estruturas da EOL sejam representadas por essas entidades, exemplo: pontos (torre anemométrica), linhas (sistema de transmissão de interesse restrito) e polígonos (área da central geradora). A resolução, ainda, estipula alguns requisitos para o protocolo desses arquivos vetoriais, sobre os quais se destaca a alínea c: "a indicação (representada por

pontos) da localização das torres dos aerogeradores e seus respectivos atributos de coordenadas, altura do eixo do cubo, comprimento das hélices e potência”

Com os dados vetoriais georreferenciados e os respectivos atributos, pode-se realizar um tratamento computacional desses dados e obter-se a RI regulatória.

O termo sistemas de informação geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. A principal diferença de um SIG para um sistema de informação convencional é sua capacidade de armazenar tanto os atributos descritivos como as geometrias dos diferentes tipos de dados geográficos. (CÂMARA *et al*, 2005, p.12)

Existem vários *softwares*, gratuitos ou pagos, que podem ser empregados para tratar a informação geográfica, no caso da ANEEL, é utilizado o Arcgis, o qual é uma plataforma de propriedade da empresa ESRI, cuja primeira versão foi lançada no início do ano 2000. Esse sistema contém alguns programas como ArcCatalog, Arcmap e Arcscene, para o estudo da RI definida pela REN 391/2009 será empregado o *software* Arcmap, o qual, também, é utilizado pela Agência Reguladora.

Neste ponto cabe diferenciar escrever um *script* de escrever um programa. Embora, também, seja um programa, o *script* é, geralmente, utilizado para automatizar uma funcionalidade dentro de outro programa (ZANDBERGEN, 2013).

Em 2004, foi lançada a versão número 9 do Arcgis que, dentre outras novidades, trouxe suporte para várias linguagens de programação empregadas para fazer automação de programas, incluindo Python que é a mais utilizada no Arcgis (ZANDBERGEN, 2013).

Desta forma, será empregada a linguagem de programação Python para automatizar e georreferenciar a representação gráfica da RI regulatória dentro do *software* Arcmap.

3. Proposta de Solução para o Problema

3.1. Metodologia

Com a publicação da REN 391/2009, a ANEEL, passou a ter que determinar a RI regulatória de uma EOL tanto para a emissão de um DRO quanto para a outorga. Ocorre que o programa com o qual seus servidores trabalham, o Arcmap, não possui uma ferramenta específica para esse fim. Assim, este trabalho desenvolverá um *script*, que será executado dentro do citado programa, para automatizar a obtenção dessa RI regulatória georreferenciada. Posteriormente, a funcionalidade do *script* será atestada por meio da inserção de dados de uma EOL hipotética, localizada no município de Caetité, estado da Bahia, pois segundo dados do BIG da ANEEL, esse é o município com a maior previsão de parques eólicos e pertence ao ente da federação com o prognóstico de ser o estado com a maior quantidade de parques eólicos quando as centrais que ainda não iniciaram a construção e em construção forem implantadas, 108 usinas correspondem ao primeiro caso e 56 respondem pelo outro.

3.2. Determinação das Características da EOL TCC

A usina será denominada de EOL TCC, com capacidade instalada de 30.000 kW, constituída por 15 aerogeradores de 2.000 kW cada, cuja altura do eixo do rotor é de 98m e seu diâmetro de 82m.

A localização relativa das turbinas, tal qual a resolução normativa, não levará em consideração as características do relevo, e será determinada em reação ao diâmetro do rotor (D). Assim, será adotada a distância entre as turbinas geralmente indicada pelos fabricantes de 5D no sentido do vento predominante e 3D no sentido perpendicular a este vento (Custódio, 2014).

Outra variável importante é a direção, sentido e frequência dos ventos, para este trabalho serão utilizados dados disponíveis na página eletrônica da EPE denominada de Acompanhamento das Medições Anemométricas – AMA. Desse *site* serão retirados os dados relativos ao estado da Bahia referentes a 3 anos completos de medição correspondentes ao período de 2013 a 2015, conforme preconiza a REN 391/2009, a qual, também, determina que sejam utilizadas direções predominantes

com frequência maior do que 10%. Esses dados de vento são extensos, tabela de 433x4, e não serão integralmente transcritos no corpo deste trabalho, no lugar deles, para comprovar a constância da direção e da frequência dos ventos na Bahia, levando em consideração a sazonalidade do recurso eólico, serão apresentadas três tabelas, referente a cada ano, com o mês central relativo a cada estação do ano.

3.3. Lógica da Programação

A RI de um aerogerador, conforme a norma, é um setor circular. Ocorre que, na versão do Arcgis disponível para os servidores da ANEEL, não existe uma ferramenta que execute diretamente essa operação, assim o núcleo do *script* é a determinação da RI dos aerogeradores e sua posterior integração para a construção da RI da central geradora como um todo.

O raio desse setor circular corresponde a $20 \times$ altura máxima da pá, e seu ângulo é explementar ao de incidência, ou seja, pode-se obtê-lo por meio da equação a seguir:

$$\hat{A}_{int} = \hat{A}_{inc} + 180^\circ \quad (1)$$

Na Equação 1, \hat{A}_{int} corresponde ao ângulo de interferência e \hat{A}_{inc} ao de incidência.

Neste momento do cálculo foi obtido o ângulo de interferência azimutal, medido em relação ao Norte geográfico, ocorre que, conforme o desenrolar da solução do problema, será necessário transformá-lo em trigonométrico para que sejam utilizadas as relações do triângulo retângulo. A tabela e equação a seguir demonstram a correlação entre as duas grandezas.

Tabela 5 – Equivalência entre Ângulo Azimutal e Trigonométrico

Direção	Azimutal	Trigonométrico
---------	----------	----------------

	(°)	(°)
Norte (N)	0	90
Leste (E)	90	0
Sul (S)	180	270
Oeste (O)	270	180

Fonte Própria

$$\hat{A}_{trigon} = \hat{A}_{azim} - 450^\circ \quad (2)$$

Na Equação 2, \hat{A}_{trigon} corresponde ao ângulo trigonométrico e \hat{A}_{azim} ao azimutal.

Uma vez que já temos o ângulo de interferência trigonométrico, passamos a dividi-lo em ângulos menores marcando pontos na circunferência de interferência. A figura a seguir ilustra esse raciocínio:

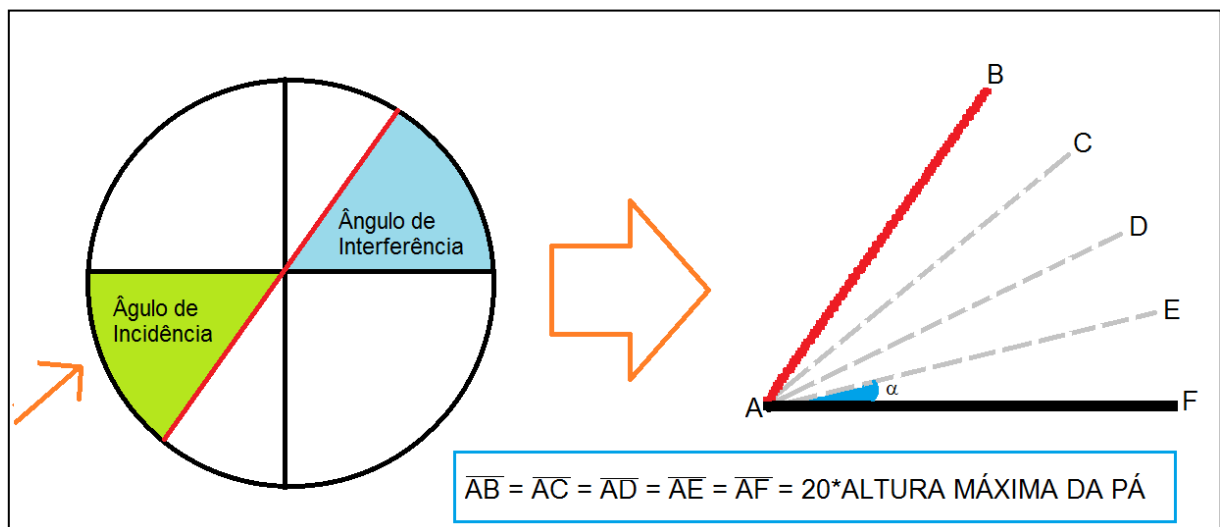


Figura 10 – Divisão do Ângulo de Interferência

Fonte Própria

Deve-se levar em consideração que estamos trabalhando no plano cartesiano e que qualquer ponto pode ser representado por suas coordenadas E (Leste) e N (Norte). Assim, considerando que os triângulos formados são retângulos, as coordenadas dos pontos podem ser obtidas em relação as do ponto A, onde se localiza o aerogerador, e ao ângulo α por meio de equações trigonométricas, conforme as equações:

$$E_E = E_A + (\cos \alpha * 20 * \textit{Altura Máxima da pá}) \quad (3)$$

$$N_E = N_A + (\sin \alpha * 20 * \textit{Altura Máxima da pá}) \quad (4)$$

Nas Equações 3 e 4, E_A e N_A correspondem a localização do aerogerador que se quer calcular a RI regulatória, E_E e N_E correspondem às coordenadas do ponto de interesse e α é o ângulo correspondente a uma subdivisão do ângulo de interferência.

Após a obtenção da matriz de pontos, basta utilizar a função de criar polígono com os vértices A, B, C, D, E e F. Dessa maneira, obtêm-se a RI de um único aerogerador, o próximo passo é a soma das RI de todos para chegar a RI da EOL.

Com a lógica da programação já mapeada, passa-se a codificação, a qual está transcrita no apêndice deste trabalho.

3.4. Imprecisão do Método Proposto

Esse método de calcular a área do setor circular dividindo-o em triângulos possui uma imprecisão, uma vez que existirá a área de um segmento circular, conforme ilustra a figura abaixo, que será deixada de fora da RI da EOL.

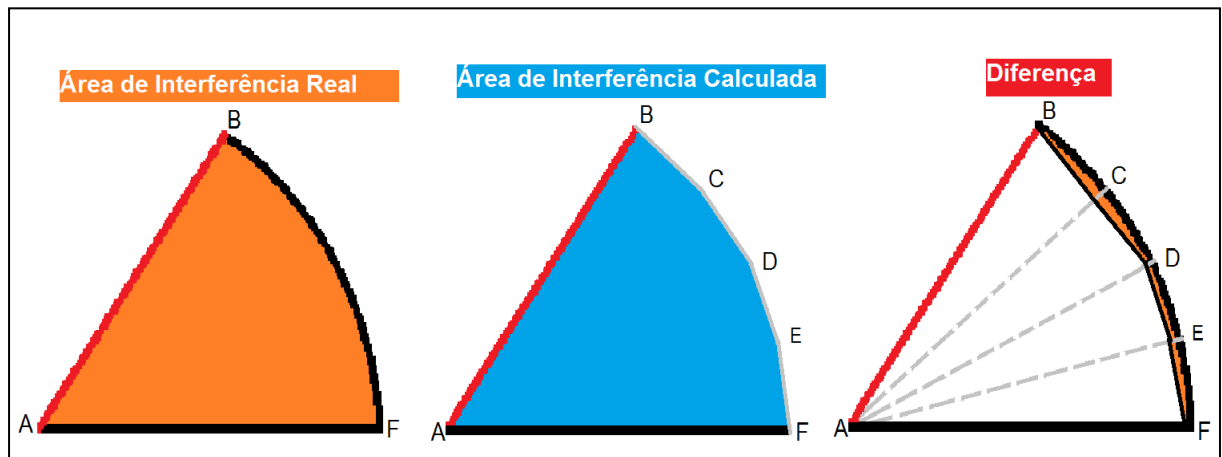


Figura 11 – Imprecisão do Método
Fonte Própria

Embora a área desse segmento circular possa ser calculada, no caso concreto, pode ser desprezada pois, conforme visto no item 2.4.3 deste trabalho, a área da RI regulatória contém a área de interferência real. Outro ponto importante é que a REN 391/2009 não veda a implantação de uma EOL na área de interferência regulatória de outro, esse regramento apenas solicita que nesses casos sejam encaminhadas declarações de ciência das centrais geradoras impactadas.

3.5. Implementação

Considerando as características do *script* e que seu acesso será franqueado a todos os servidores da ANEEL que trabalham com a REN 391/2009, a sua distribuição ocorrerá por meio de um banco de dados georreferenciado, *geodatabase*⁷. Esse banco de dados será constituído das classes de feições criadas pelo programa e a caixa de ferramenta, que o conterà. Também, será criada uma interface gráfica para ajudar o usuário a interagir com o código criado. Dessa forma, para que o servidor utilize o *script*, basta que informe o caminho de rede para o Arcmap.

⁷ Segundo o tópico de ajuda do Arcmap, um Geodatabase (GDB) é um banco de dados relacional que armazena dados geográficos, funcionando como uma caixa que contém dados espaciais, atributos e regras de relacionamento entre eles.

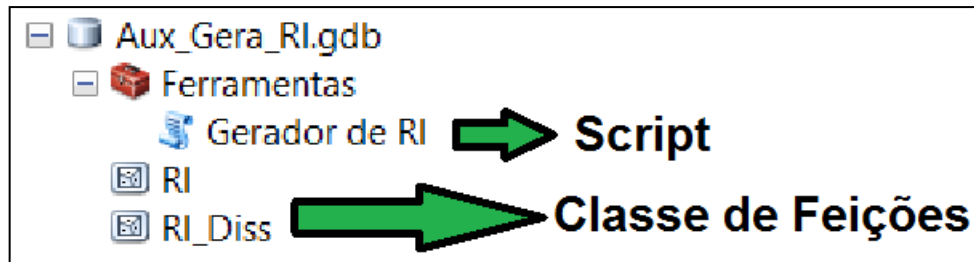


Figura 12 – Implementação do Script
Fonte Própria

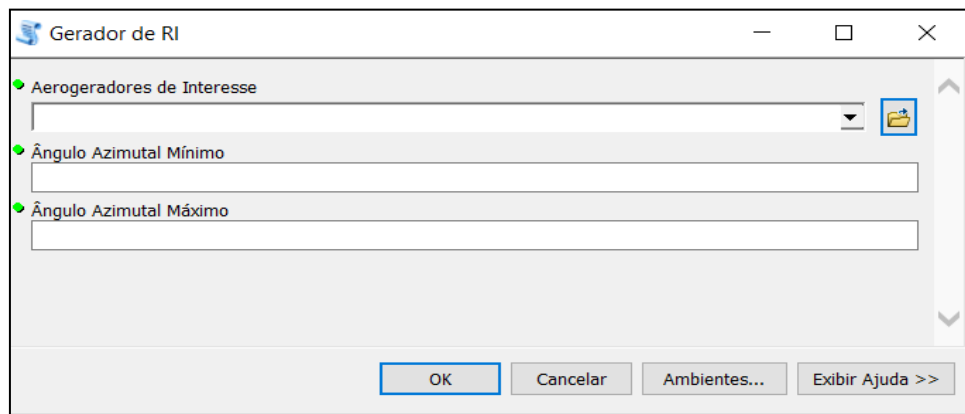


Figura 13 – Interface Gráfica do Script
Fonte Própria

3.6.Determinação das Características da EOL TCC

Conforme já mencionado a EOL TCC, possui 30.000 kW de capacidade e conta com 15 aerogeradores com altura do eixo do rotor é de 98m e seu diâmetro de 82m de 2.000 kW cada. Essa usina utilizará a topologia 5Dx3D, e, em concordância com as tabelas a seguir, ângulos centrais de incidência de 90° e 120°

Tabela 6 – Direção e Frequência dos Ventos do Estado da Bahia ano de 2013

Direção	Frequência (%)			
	Verão (Fevereiro)	Outono (Maio)	Inverno (Agosto)	Primavera (Novembro)
0	0,07	0,35	0,04	1,88
30	0,15	0,84	0,14	2,84
60	4,19	6,41	4,64	8,77
90	56,47	46,85	57,43	46,95
120	33,36	35,54	34,49	27,63
150	4,84	3,16	2,03	3,24
180	0,29	1,08	0,27	1,5
210	0,14	1,04	0,29	1,32

240	0,15	1,55	0,33	1,37
270	0,12	1,81	0,22	1,16
300	0,11	0,98	0,08	1,71
330	0,1	0,4	0,03	1,64

Fonte: Própria com dados do AMA, EPE

Tabela 7 – Direção e Frequência dos Ventos do Estado da Bahia ano de 2014

Direção	Frequência (%)			
	Verão (Fevereiro)	Outono (Maio)	Inverno (Agosto)	Primavera (Novembro)
0	0,58	0,19	0,58	2,38
30	0,75	0,35	0,75	2,65
60	4,14	4,3	4,14	7,96
90	54,52	40,59	54,52	44,06
120	34,53	45,04	34,53	31,16
150	2,27	5,4	2,27	2,69
180	0,35	1,05	0,35	0,8
210	0,26	0,98	0,26	0,7
240	0,46	0,94	0,46	1,19
270	0,78	0,57	0,78	1,9
300	0,71	0,33	0,71	2,34
330	0,65	0,25	0,65	2,17'

Fonte: Própria com dados do AMA, EPE

Tabela 8 – Direção e Frequência dos Ventos do Estado da Bahia ano de 2015

Direção	Frequência (%)			
	Verão (Fevereiro)	Outono (Maio)	Inverno (Agosto)	Primavera (Novembro)
0	2,78	0,13	0,02	2,61
30	2,93	0,38	0,08	2,87
60	6,33	3,96	3,95	9,32
90	41,7	38,88	45,94	41,49
120	35,61	46,65	45,36	27,71
150	3,95	7,69	4,19	3,77
180	0,56	0,37	0,24	1,51
210	0,39	0,31	0,08	1,34
240	0,71	0,56	0,06	1,64
270	1,14	0,68	0,04	2,27
300	1,59	0,29	0,02	2,63
330	2,32	0,11	0,02	2,85

Fonte: Própria com dados do AMA, EPE

Com a direção predominante do vento e os dados dos aerogeradores, pode-se montar o esquema de distribuição das turbinas no terreno:

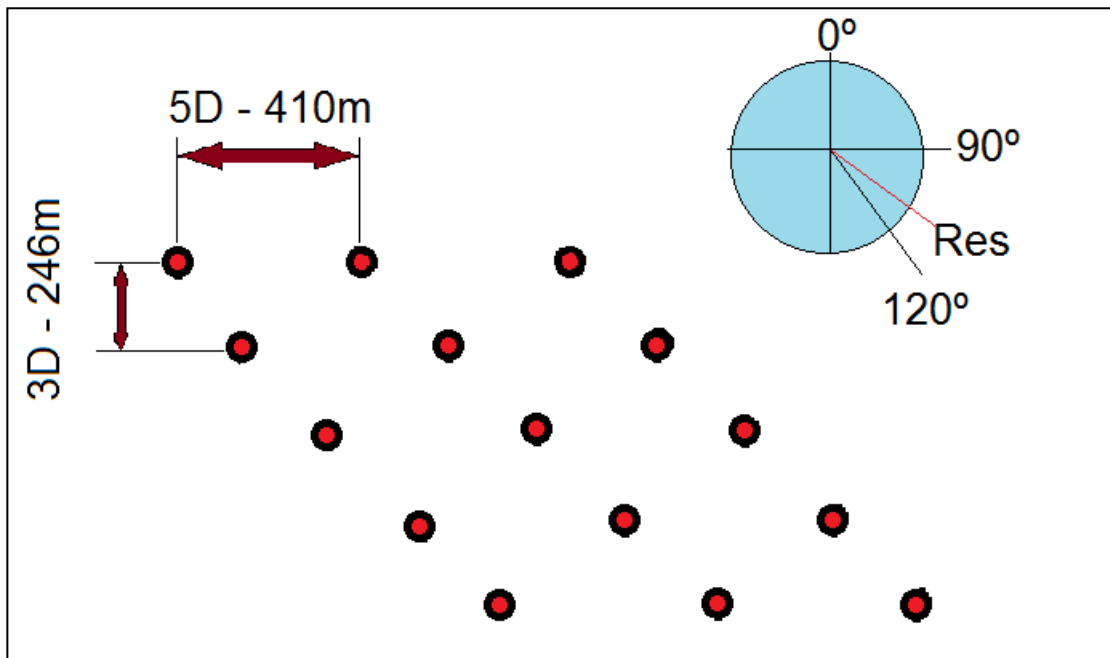


Figura 14 – Aerogeradores da EOL TCC e Direção Resultante do Vento

Fonte Própria

Conforme já mencionado neste trabalho, a REN 391/2009 determina o protocolo de dados georreferenciados em planilhas ou vetores, seguindo modelo disponível na página da ANEEL. Este estudo lançará mão da parte desses dados relativa aos aerogeradores, em formato vetorial, *shape*, e da direção e sentido dos ventos cuja frequência seja acima de 10%, ou seja, 90° e 120°. Assim, com base nas informações dos aerogeradores e dos respectivos critérios de localização, obtém-se a tabela de atributos e a localização da EOL TCC:

Tabela 9 – Atributos dos Aerogeradores da EOL TCC

NOME_EOL	DEN_AEG	E	N	ALT_ROTOR	DIAM_ROTOR
TCC	TCC_01	771173,7	8451953,5	98	82
TCC	TCC_02	771123,7	8451707,5	98	82
TCC	TCC_03	771073,7	8451461,5	98	82
TCC	TCC_04	771023,7	8451215,5	98	82
TCC	TCC_05	770973,7	8450969,5	98	82
TCC	TCC_06	770763,7	8451953,5	98	82
TCC	TCC_07	770713,7	8451707,5	98	82
TCC	TCC_08	770663,7	8451461,5	98	82
TCC	TCC_09	770613,7	8451215,5	98	82
TCC	TCC_10	770563,7	8450969,5	98	82
TCC	TCC_11	770353,7	8451953,5	98	82
TCC	TCC_12	770303,7	8451707,5	98	82

TCC	TCC_13	770253,7	8451461,5	98	82
TCC	TCC_14	770203,7	8451215,5	98	82
TCC	TCC_15	770153,7	8450969,5	98	82
* DATUM SIRGAS 2000, Fuso 23 S					

Fonte Própria

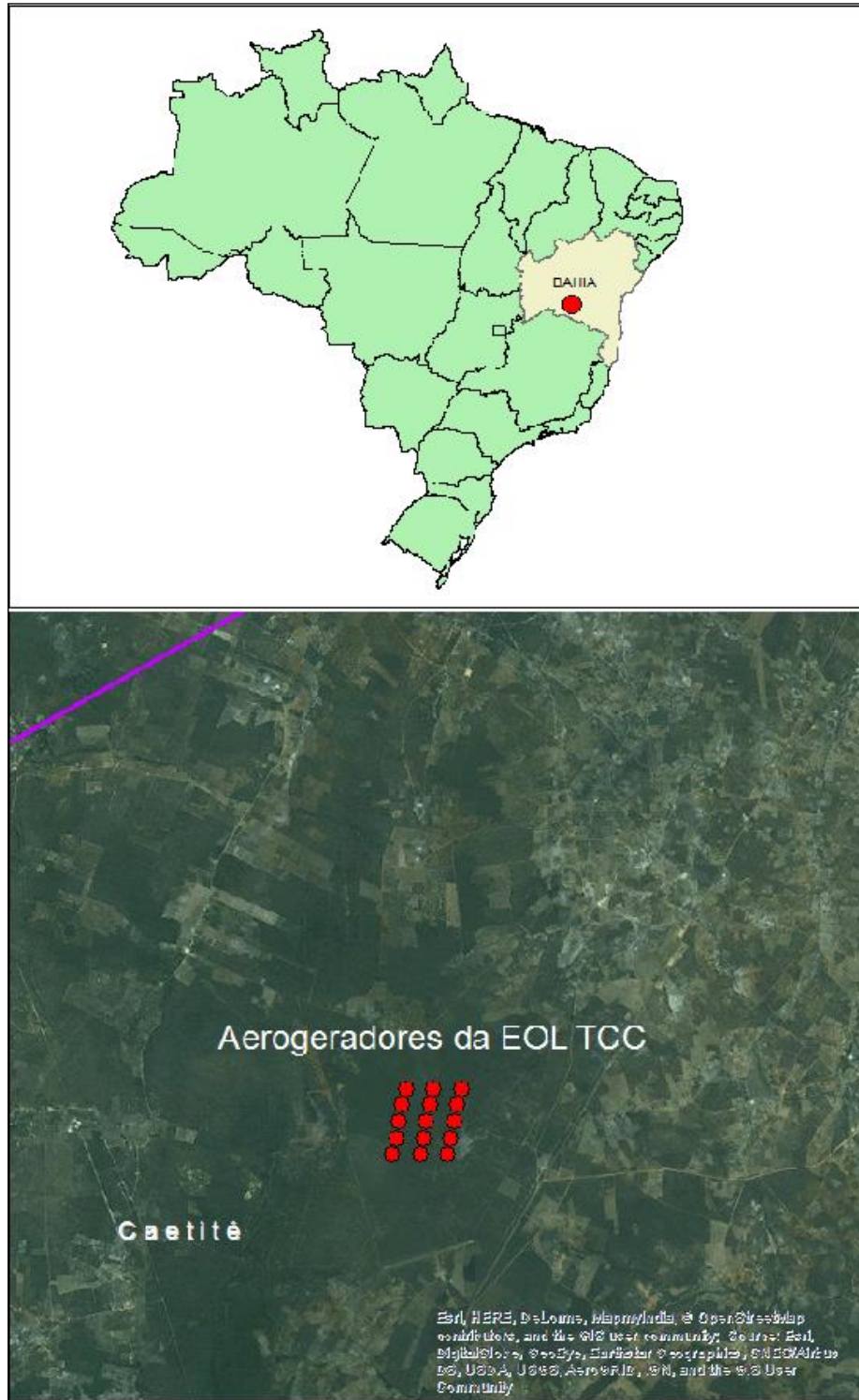


Figura 15 - Aerogeradores da EOL TCC Georreferenciados

Fonte Própria

4. Resultados

4.1. Imagem Georreferenciada da RI Regulatória da EOL TCC.

Retomando as informações sobre a EOL TCC descrita no item 3.7, temos os dados vetoriais dessa central geradora e o ângulo de incidência de 90° e 120° . O primeiro passo é saber qual será o ângulo de incidência mínimo e o máximo, ambos dependem do número de pétalas que formam a rosa dos ventos. Por padrão, no Sumário de Certificação da REN 391/2009 a rosa dos ventos está dividida em 16 pétalas, mas como estamos utilizando os dados de vento do AMA da EPE, a rosa dos ventos do nosso estudo está dividida em doze pétalas. Assim, temos um ângulo de incidência mínimo de 75° e máximo de 135° . Após essa definição, basta colocar os dados na interface gráfica do *script*.

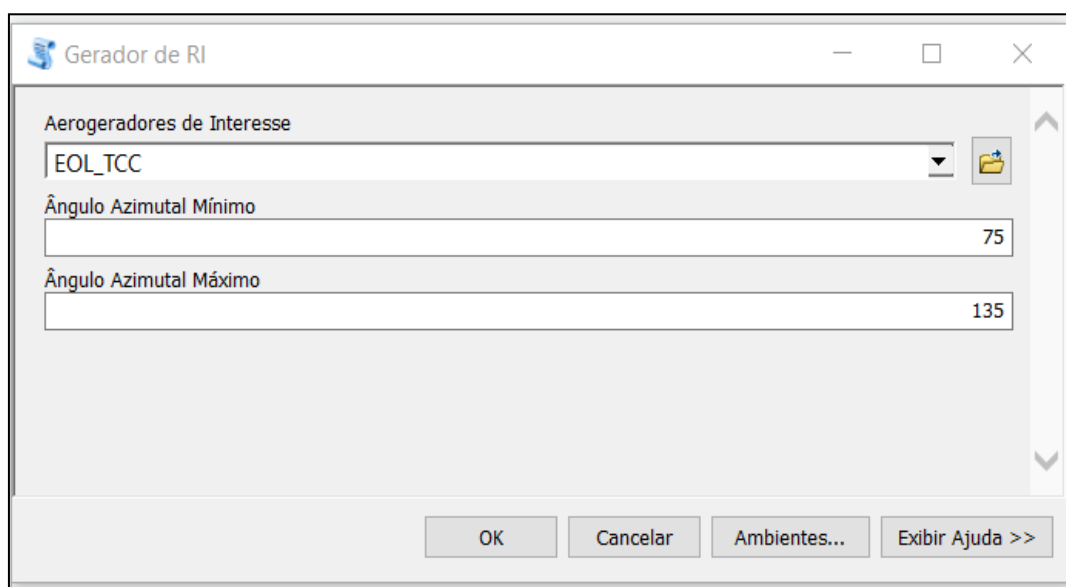


Figura 16 – Inserção de Dados no Script

Fonte Própria

Após executar o *script*, obtêm-se duas classes de feição, a RI que representa as RI individuais dos aerogeradores da EOL TCC e RI_Diss que retrata a RI regulatória definida pela REN 391/2009. As figuras a seguir demonstram os dois desenhos.

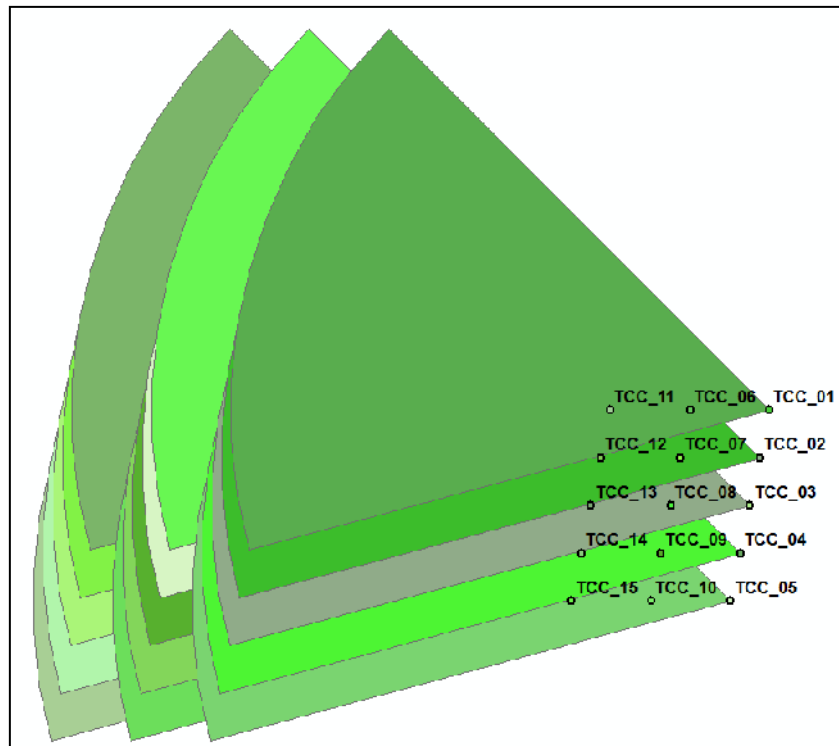


Figura 17 – RI Regulatória por Aerogerador da EOL TCC
Fonte Própria

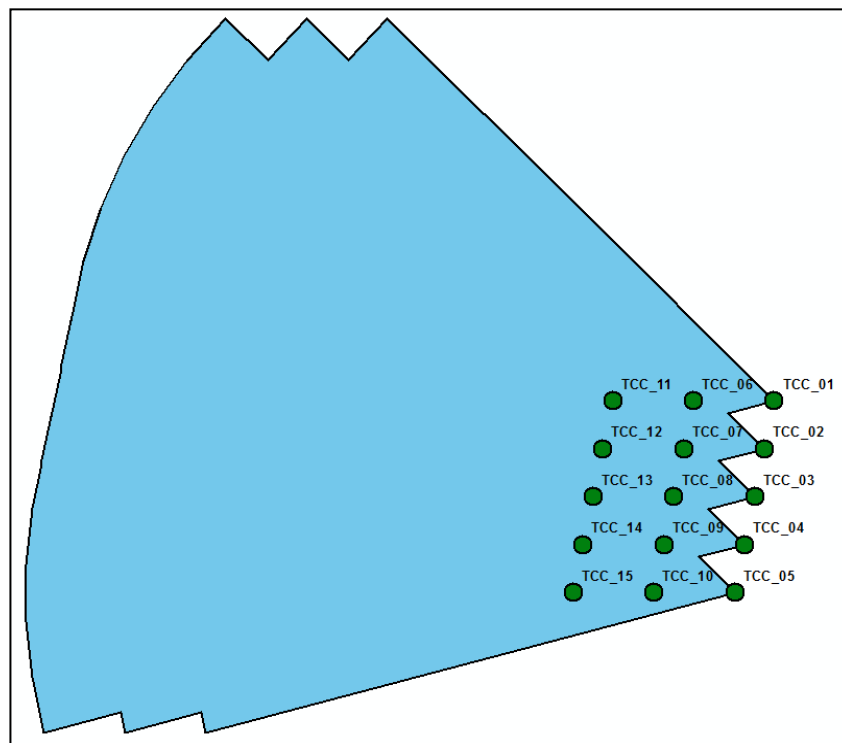


Figura 18 – RI Regulatória da EOL TCC
Fonte Própria

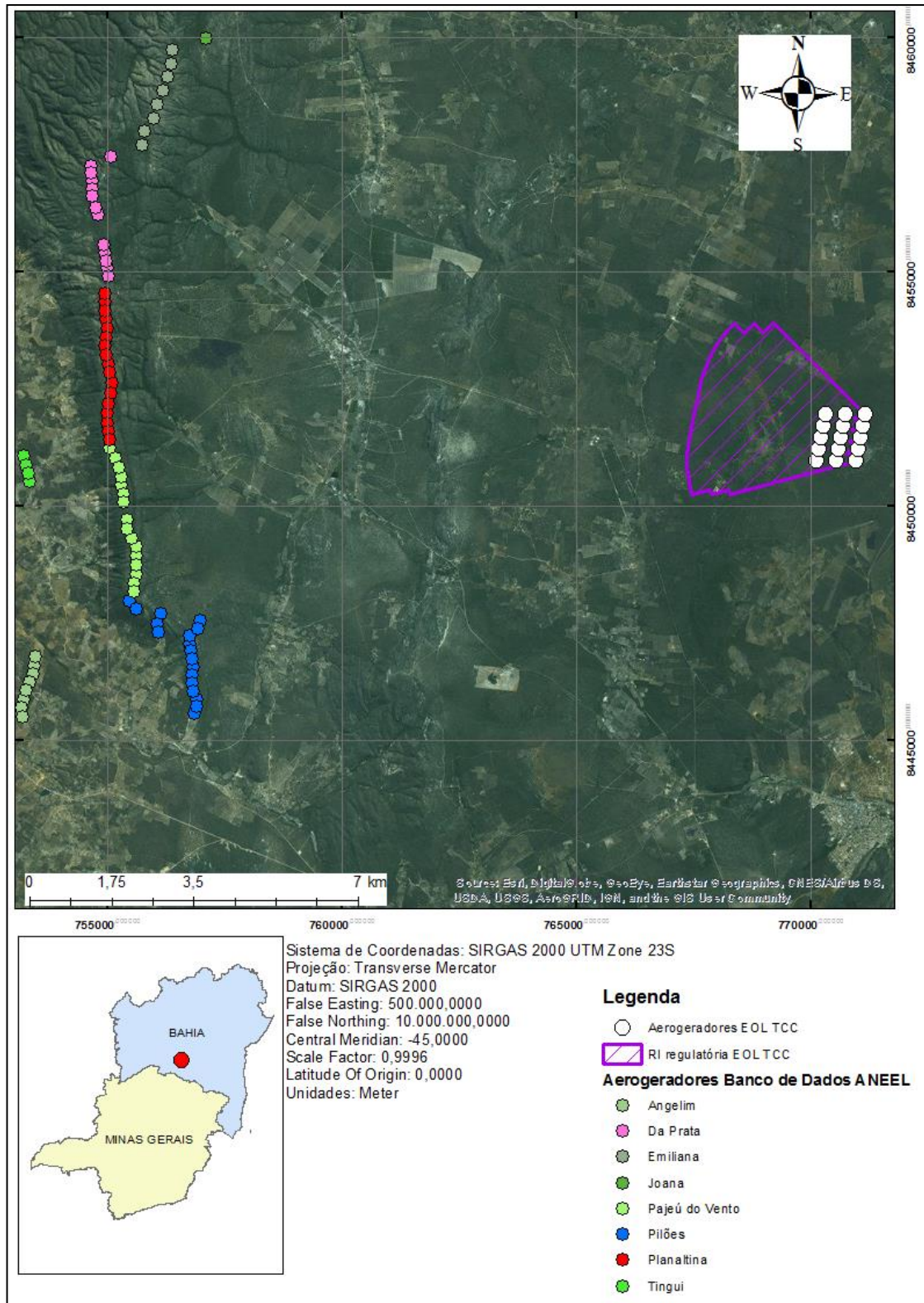


Figura 19 – RI Regulatória Georreferenciada da EOL TCC
 Fonte Própria

5. Conclusão

5.1. Considerações Finais

O intuito desse trabalho foi oferecer uma solução possível para a problemática que a ANEEL tem de representar as RI regulatórias descritas na REN 391/2009, dificuldade que tende a se tornar mais crítica não só pelo aumento da quantidade de eólicas, mas também pelas características e tendências desse mercado tais como o crescimento do tamanho dos aerogeradores, o adensamento espacial dessas centrais geradoras, a predisposição dos interessados em fatiar os complexos eólicos em centrais geradoras menores, e a profusão de pedidos de alteração de características técnicas dessas usinas. Assim, o *script* retratado nessas páginas pode tornar mais célere a análise e tomada de decisão por parte dos servidores da ANEEL.

5.2. Sugestões de Melhorias

Nem todas as regiões do país possuem regime de ventos tão constantes como os da Bahia. Desta forma, pode-se fazer uma melhoria no *script* implementando a possibilidade da inserção de direções de vento disjuntas. Outro ponto que merece destaque é a possibilidade de se automatizar os cálculos dos ângulos de Incidência inicial e final, ou ainda, obtê-los diretamente da tabela encaminhada pelo interessado.

Finalmente, pode haver um grande ganho para o setor eólico se a ANEEL disponibilizar, juntamente com as RI de EOL com DRO ou outorgada, um aplicativo *on line* para representação gráfica georreferenciada da RI regulatória. Assim, o interessado poderia, ele mesmo, obter a RI regulatória de seu parque eólico e, até mesmo, observar se existe alguma interferência antes mesmo de pedir o DRO para a EOL.

6. Bibliografia

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Banco de Informações de Geração - BIG. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao>. Acesso em: mar. 2017.

BERTUCCI, Janete Lara de Oliveira, Metodologia Básica para Elaboração de Trabalhos de Conclusão de Cursos (TCC): Ênfase na Elaboração de TCC de pós-graduação Lato Sensu. -1ª edição -7ª Reimpr. – São Paulo: Atlas, 2015.

BP. BP Energy Outlook 2017 Edition, 2017. Disponível em: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>. Acesso em: mar. 2017.

Burton, Tony. et al, Wind Energy Handbook. 2ª edição – West Sussex : John Wiley & Sons, 2011.

CÂMARA, Gilberto. et al, Bancos de Dados Geográficos - Curitiba : MundoGeo, 2005.

Eletrobrás. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). Disponível em: <http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>. Acesso em: mar. 2017.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2016.

GÖÇMEN, T. et al. Wind turbine wake models developed at the technical university of Denmark: A review', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Colorado, v. 60, p. 752-769, jul. 2016.

International Energy Agency – IEA. Energy and Climate Change, World Energy Outlook Special Report, 2015. Disponível em: <http://www.worldenergyoutlook.org/energyclimate/>. Acesso em: mar. 2017.

JAIN, P. Wind Energy Engineering. 2ª edição - Nova Iorque : McGraw Hill Education, 2016.

LEITE, Antônio Dias, A Energia do Brasil. 3ª edição – Rio de Janeiro: Lexikon, 2014.

Moreira, Álvaro Fagundes. Avaliação do Requisito de Tempo de Medição Anemométrica para Autorização e Contratação de Novos Parques Eólicos no Brasil. 2016. 69f. Dissertação (Mestrado Profissional em Economia do Setor Público) – Departamento de Economia, Universidade Federal de Brasília. Brasília

Operador Nacional do Sistema – ONS. Histórico da Operação. Disponível em <http://www.ons.org.br/historico/index.aspx>. Acesso em: mar. 2017.

World Wind Energy Association – WWEA. WWEA Half-year Report, 2016. Disponível em: <http://www.wwindea.org/information-2/information/>. Acesso em: mar. 2017.

ZANDBERGEN, Paul A., Python Scripting for ArcGis. 1ª edição – Redlands : Esri Press, 2013.

APÊNDICE – A Codificação

```
# -*- coding: cp1252 -*-
```

```
#----- Bibliotecas -----
```

```
import arcpy
```

```
import math
```

```
#----- Ambiente de Trabalho -----
```

```
arcpy.env.workspace = "Aux_Gera_RI.gdb"
```

```
arcpy.env.overwriteOutput = True
```

```
#----- Variáveis -----
```

```
infc = arcpy.GetParameterAsText(0)
```

```
AZmin = arcpy.GetParameter(1)
```

```
AZmax = arcpy.GetParameter(2)
```

```
newfcRI = "RI"
```

```
newfcRI_Diss = "RI_Diss"
```

```
#----- Definição da Referência Espacial dos Produtos dos Cálculos -----
```

```
arcpy.env.outputCoordinateSystem = arcpy.Describe(infc).spatialReference
```

```
#----- Criação de Classe de Feição -----
```

```
arcpy.CreateFeatureclass_management(arcpy.env.workspace,newfcRI,"POLYGON")
```

```
arcpy.AddField_management (newfcRI, "NOME_EOL", "TEXT")
```

```
arcpy.CreateFeatureclass_management(arcpy.env.workspace,newfcRI_Diss,"POLYGON")
```

```
#----- Obtenção e Subdivisão do Ângulo de Interferência Trigonométrico -----
```

```
ang_ini = (630 - AZmax)*2*math.pi/360
```

```
ang_fim = (630 - AZmin)*2*math.pi/360
```

```
ang_div10 = (ang_fim-ang_ini)/10
```

```
#-----Obtenção da RI de cada Aerogerador-----
```

```
cursor = arcpy.da.InsertCursor(newfcRI, ["SHAPE@", "NOME_EOL"])
cursor_in = arcpy.da.SearchCursor(infc, ["SHAPE@XY", "NOME_EOL", "ALT_TOTAL"])
for row in cursor_in:
    Altmax = row [2]
    if Altmax > 1:
        Raio_m = Altmax*20
        x,y = row[0]
        array = arcpy.Array ([arcpy.Point(x+(math.cos(ang_ini)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_ini)*Raio_m)), arcpy.Point(x, y),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim)*Raio_m)),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim-ang_div10)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim-ang_div10)*Raio_m)),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim-ang_div10*2)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim-ang_div10*2)*Raio_m)),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim-ang_div10*3)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim-ang_div10*3)*Raio_m)),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim-ang_div10*4)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim-ang_div10*4)*Raio_m)),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim-ang_div10*5)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim-ang_div10*5)*Raio_m)),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim-ang_div10*6)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim-ang_div10*6)*Raio_m)),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim-ang_div10*7)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim-ang_div10*7)*Raio_m)),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim-ang_div10*8)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim-ang_div10*8)*Raio_m)),
                              arcpy.Point(x+(math.cos(ang_fim-ang_div10*9)*Raio_m),
                                          y+(math.sin(ang_fim-ang_div10*9)*Raio_m))])
        polygon = arcpy.Polygon(array)
        cursor.insertRow((polygon, row[1]))

del cursor
```

```
del cursor_in
```

```
#-----Obtenção da RI da EOL-----
```

```
arcpy.Dissolve_management(newfcRI,newfcRI_Diss,"NOME_EOL","", "", "")
```