



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - ICIAG
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL



Estimativa das emissões de enxofre pelos sistemas isolados - geradores à diesel - na bacia amazônica central

Frederico Novais Coelho

UBERLÂNDIA – MG

2018

Frederico Novais Coelho

**Estimativa das emissões de enxofre pelos
sistemas isolados - geradores à diesel - na
bacia central amazônica**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador:

Prof^a. Dra. Samara Carbone

UBERLÂNDIA – MG

2018

Sumário

1	RESUMO	4
2	Introdução	5
3	Metodologia	9
3.1	Descrição da área de estudo.....	9
3.2	Dados do ATTO	10
3.3	Dados da ANEEL	10
3.4	Dados da Eletrobrás.....	10
3.5	Cálculo quantidade de energia gerada.....	11
3.6	Cálculo do volume de combustível.....	11
3.7	Calculo da emissão de enxofre	12
3.8	Softwares para análise de dados	13
4	Resultados e discussão	13
4.1	Consumo de diesel pelos geradores.....	13
4.2	Trajétórias de massas de ar	15
4.3	Emissão de enxofre.....	19
4.4	Medidas de sulfato em aerossóis atmosféricos.....	21
5	Conclusão.....	23
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	23
	AGRADECIMENTOS.....	24
	REFERÊNCIAS	25
	ANEXOS.....	27

1 RESUMO

A Floresta Amazônica representa aproximadamente um terço das florestas tropicais mundiais e é de grande importância do ponto de vista de estoque de carbono, ciclo hidrológico, biodiversidade e balanço energético do planeta. O desenvolvimento da região Norte aumentou a demanda por energia elétrica no interior da floresta, nas últimas décadas, o que trouxe a necessidade de instalação de pequenas unidades geradoras de energia elétrica, os chamados sistemas isolados. Estas pequenas unidades geradoras utilizam principalmente o óleo diesel como combustível. Este trabalho apresenta resultados preliminares no sentido de quantificar as emissões geradas a partir da combustão deste combustível emitido para a atmosfera da Floresta Amazônica. Foram utilizados dados de consumo de combustíveis pelas unidades geradoras nos anos de 2013 a 2016 fornecidos pela Eletrobrás e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), bem como dados de aerossóis de sulfato medidos na bacia central amazônica na estação Amazonian Tall Tower Observatory (ATTO) com foco nas emissões vento acima desta estação (quadrante de estudo). Dentro do quadrante de estudo foram identificadas 138 unidades geradoras onde 68,8% utilizam óleo diesel como principal combustível. No total, essas unidades consumiram pelo menos 2.049.399,33 m³ de diesel no período de 2014 a 2016, totalizando 3.135,6 toneladas de enxofre emitido para a atmosfera, considerando um cenário onde todo o diesel é do tipo S1800, e 871 toneladas se o diesel for do tipo S500. Também verificou-se um comportamento sazonal no consumo de diesel, ou seja, maior consumo nos meses referentes à estação seca (agosto - outubro), em comparação aos meses da estação chuvosa (fevereiro – maio). Este padrão é parecido com as concentrações de aerossóis. Não foi observada interferência direta da queima do combustível utilizado pelas unidades geradoras nas medidas de aerossóis de sulfato na estação ATTO, no entanto, é possível que estas emissões interfiram no valor background de enxofre sobre a bacia amazônica.

2 INTRODUÇÃO

A Amazônia representa hoje, cerca de 40% de toda a região de floresta tropical no mundo. Corresponde a 61% do território brasileiro, sendo crucial para a manutenção da biodiversidade, os processos hidrológicos e o equilíbrio climático na região e no mundo (MALHI et al., 2008; SOARES et al., 2006) uma vez que provem dela, 20% da descarga mundial de água doce nos oceanos (DAVIDSON; ARTAXO, 2004). Por essa magnitude, em pontos onde não atuam os efeitos de borda, as condições atmosféricas da floresta se assemelham as de oceanos em termos de concentração de aerossóis (ANDREAE, 2007).

Os aerossóis atmosféricos são partículas suspensas no ar, líquidas e/ou sólidas, com diâmetro menor que 100 μm , emitidas diretamente pelas fontes naturais e/ou antropogênicas, ou provenientes da conversão de gases atmosféricos em partículas, conhecidos, respectivamente como aerossóis primários e aerossóis secundários. Eles são importantes porque em altas concentrações podem afetar a saúde humana e são capazes de influenciar o clima e a dinâmica atmosférica, reduzindo e oxidando gases atmosféricos, participando do processo de formação de nuvens e interferindo no balanço de radiação solar (SEINFELD; PANDIS, 2006). Os aerossóis também são chamados de material particulado (MP) e de acordo com o seu diâmetro são conhecidos como MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$, sendo o diâmetro menor que 10 μm e 2,5 μm , respectivamente (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Entre os meses de fevereiro a maio, os aerossóis na atmosfera da Floresta Amazônica apresentam baixas concentrações (10-15 $\mu\text{g m}^{-3}$), (ARTAXO et al., 2005), nesta época do ano, conhecida como estação chuvosa, (Figura 1). Nesta estação a precipitação esperada soma 1215 mm (INMET) e retira o MP da atmosfera, com maior facilidade, por deposição úmida. Já durante a estação seca, que vai de agosto a outubro, a concentração de aerossóis suspensos chega a valores maiores que 100 $\mu\text{g m}^{-3}$, (ARTAXO et al., 2005), como consequência do baixo volume de chuvas neste período (220mm) e pelo aumento das emissões. Essas condições climáticas, além de contribuir pouco para remover os aerossóis da atmosfera, também intensificam as queimadas e as atividades antropogênicas que consomem combustíveis fósseis.

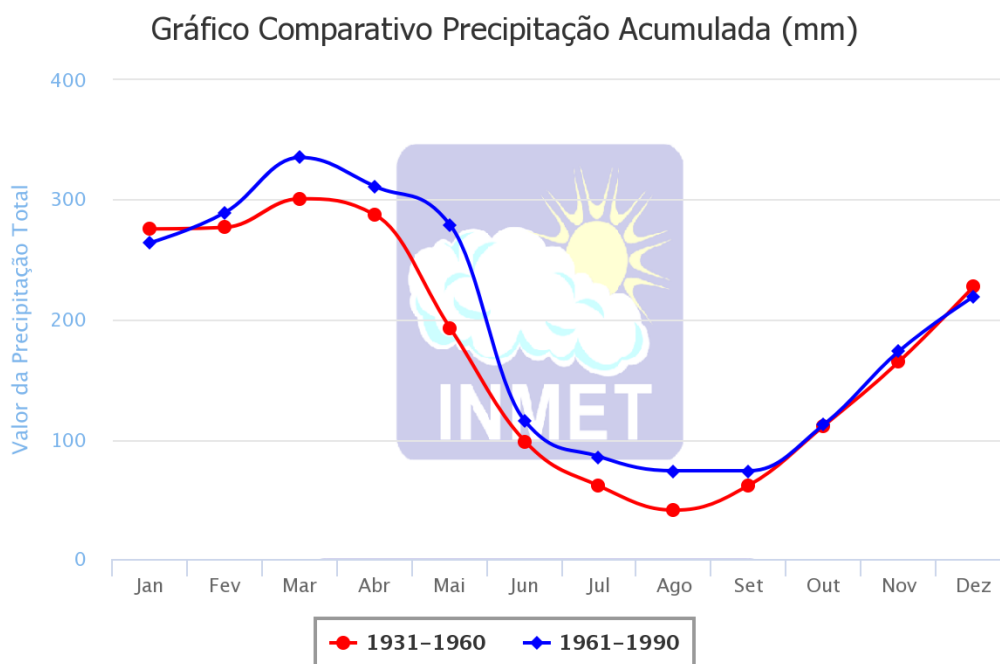


Figura 1 - Normais climatológicas de 1931 a 1960 e de 1961 a 1990 da precipitação acumulada da estação climatológica de Manaus. Fonte: INMET

Dentre a composição química dos aerossóis está o enxofre, que é emitido principalmente como dióxido de enxofre (SO_2) e pode reagir com diversos agentes oxidantes presentes na atmosfera, gerando gotículas de H_2SO_4 ou partículas neutralizadas como o sulfato de amônio. Esses compostos reduzem o pH das gotículas de chuva, acarretando a formação de chuvas ácidas (ANDREAE et al., 2002; MARTIN et al., 2010).

A chuva ácida pode gerar acidificação de corpos hídricos, afetar a biota local com a morte de larvas, insetos e pequenas algas, além disso, toda cadeia alimentar pode sofrer um desequilíbrio, afetando níveis tróficos mais altos, como peixes e anfíbios. O pH baixo das chuvas também pode acidificar o solo, afetando os microrganismos e a germinação de sementes e facilitar o arraste de metais pesados do solo para lagos e rio, gerando problemas de intoxicação para a vida aquática (SILVA et al., 2013).

As principais fontes naturais de enxofre para a atmosfera são as queimadas, emissões vulcânicas e biogênicas e as reações bacterianas. Já as fontes antropogênicas se concentram na queima de combustíveis fósseis e biomassa e atividades industriais como refino de petróleo e a metalurgia (ALVES, 2005). As fontes de sulfato na bacia central da Amazônia ainda não são bem caracterizadas, mas

encontra-se partículas de enxofre vindas do continente africano e europeu, além das fontes regionais provenientes de queimadas e das metrópoles do próprio continente.

Os ventos incidentes na região são altamente dependentes da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que sofrem alterações significativas em turnos sazonais. Na estação chuvosa, quando a ZCIT está a 20°S, englobando o planalto central amazônico, as massas de ar chegam predominantemente por Nordeste, passando por toda a região de floresta tropical antes de chegar as torres de monitoramento (MARTIN et al., 2010). Durante essa estação, as correntes de ar de longo alcance podem trazer partículas provenientes do oceano atlântico, do deserto do Saara, das queimadas na África ocidental e possivelmente poluição da Europa (MARTIN et al., 2010). Esse padrão de ventos muda com a chegada da estação seca, quando a ZCIT começa a se deslocar para o norte, é quando a região do ATTO recebe massas de ar de leste e sudeste do Brasil, predominantemente. São nessas condições atmosféricas, que há maior probabilidade de serem detectados aerossóis provenientes de queimadas e ações antrópicas no continente.

A Floresta Amazônica é uma barreira física, ambiental e econômica para a construção de linhas de transmissão elétrica, por isso grande parte da região Norte não é interligada. O Sistema Interligado Nacional - (SIN) é o sistema de geração e transmissão de energia elétrica que cobre todo o território nacional, mas é na região Norte, sua menor abrangência, (Figura 2). Para suprir as demandas energéticas dessas regiões, a população recorre aos Sistemas Isolados de energia que, em sua maioria, são geradores movidos à combustíveis fósseis.

A necessidade de se entender e quantificar as relações entre vegetação, química atmosférica e os aerossóis em condições naturais e em condições alteradas pela ação antrópica nesse ecossistema, levou a instalação da estação Amazon Tall Tower Observatory (ATTO) na bacia central da Amazônia em 2010 (ANDREAE et al., 2015). Nesta estação medidas contínuas de diferentes propriedades atmosféricas são feitas em tempo real.

Essa demanda de combustíveis fósseis na região incitou a hipótese central do trabalho, de que as emissões provindas dos geradores teriam a magnitude e o potencial para influenciar no aumento das concentrações dos aerossóis atmosféricos. Assim, o objetivo desse estudo é estimar as emissões de enxofre provindas dos geradores da região norte, e verificar a possível interferência deste poluente na bacia central amazônica através de medidas realizadas na estação ATTO.

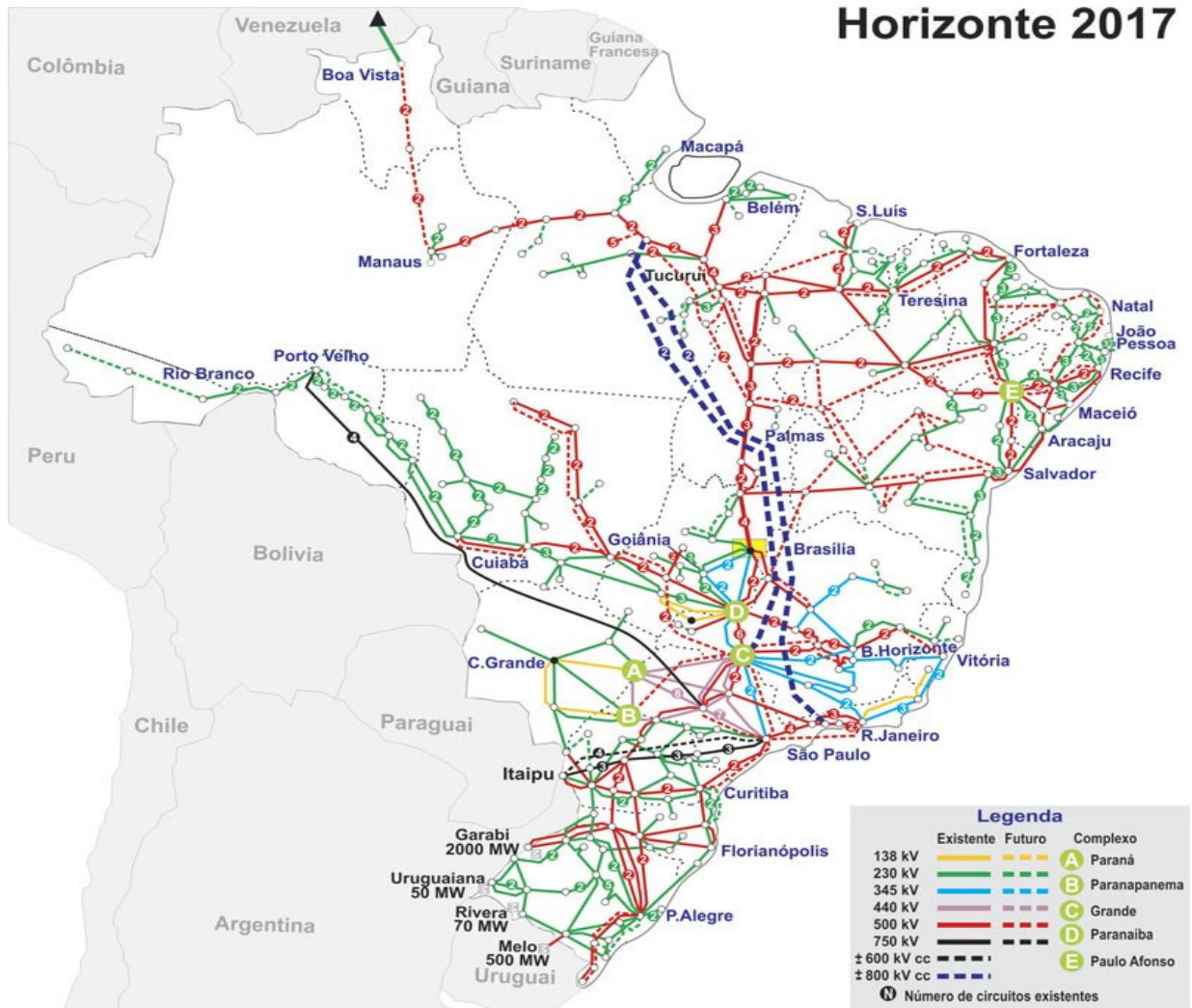


Figura 2 - Mapa do Sistema Interligado Nacional (SIN) Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2016.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição da área de estudo

Os dados que levaram a elaboração desse trabalho foram obtidos na estação ATTO (S 02° 08.602', W 59° 00.033), onde inúmeras torres (60, 80 e 325 m) encontram-se instaladas para medidas de variáveis atmosféricas. Esta estação está situada na Reserva de Desenvolvimento Sustentável de Uatumã, na Amazônia central. A estação de monitoramento em questão situa-se à 150 km a noroeste do centro da cidade de Manaus (AM) aproximadamente 12 km ao noroeste do Rio Uatumã, Figura 3.

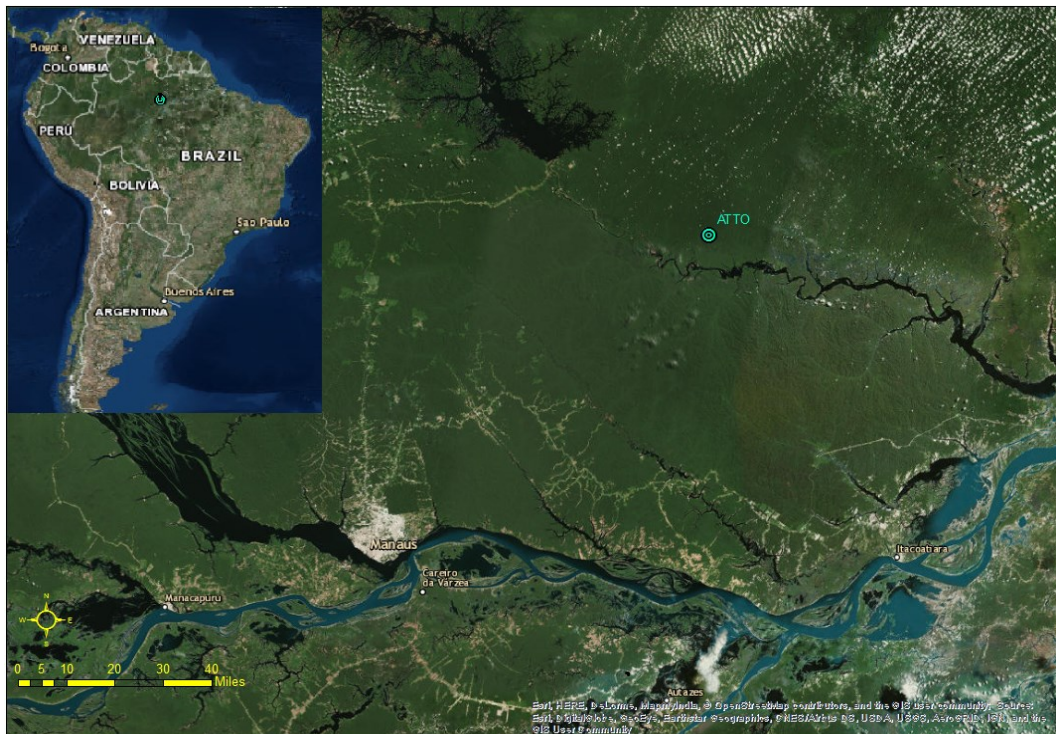


Figura 3 - localização geográfica da estação de monitoramento ATTO nas coordenadas (S 02° 08.602', W 59° 00.033). Fonte: Google Maps

O clima presente é o tropical úmido, caracterizado pela estação chuvosa (fevereiro a maio) e pela estação seca (agosto a outubro). De acordo com a estação meteorológica de Manaus, a mais próxima da área de estudos, a média pluviométrica anual é de 2200 mm, a temperatura média compensada é de 26,7°C e a umidade relativa do ar é de 83,1% (INMET, 2018).

Diferentes ecossistemas florestais compõem a região. No platô central, onde a máxima altitude é de 130 metros, há predominância de florestas densas, de terra firme

(não alagáveis) onde a altura máxima do dossel varia entre 30 a 35 metros. Ao longo do rio Uatumã e seus tributário, predominam as florestas aluviais ombrófilas densas (igapós). Na intersecção dessas vegetações ainda podemos encontrar campinas e campinaras, variando de acordo com o relevo (ANDREAE et al., 2015) .

3.2 Dados do ATTO

A estação de monitoramento capta, em tempo real, os níveis de concentração atmosférica de vários poluentes, dentre eles o sulfato. Esse trabalho utilizou os dados de concentração de massa do sulfato entre 2014 e 2016 para avaliar os níveis atuais de sulfato encontrado na atmosfera e correlaciona-los com as estimativas obtidas no cálculo de emissão dos geradores.

3.3 Dados da ANEEL

A ANEEL possui o Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL), onde foram obtidos os dados das centrais geradoras de energia (ANEEL, 2017). Esses dados são georreferenciados e contém, atrelados à latitude e longitude, informações essenciais tais como, localização dos geradores, a potência útil instalada, o estágio de operação e o tipo e a classificação do combustível utilizado pelos motores.

3.4 Dados da Eletrobrás

Os dados obtidos no site da Eletrobrás relacionados aos geradores na região Norte contém quantidades mensais de geração energética e consumo de combustível(ELETROBRAS, [s.d.]), porém esses dados não são georreferenciados e, comparados aos dados da ANEEL, possuem uma quantidade muito inferior de geradores catalogados, o que reduziria as estimativas de emissão na região e impossibilitaria correlaciona-los com a dinâmica atmosférica. Apesar disso, esses dados foram essenciais para a análise da sazonalidade do consumo de diesel e para o cálculo do volume de combustível individual dos geradores catalogados pela ANEEL.

3.5 Cálculo quantidade de energia gerada

Os dados que a ANEEL disponibiliza sobre os geradores georreferenciados contém a potência elétrica instalada de cada central. Para obter a quantidade de energia gerada por cada central geradora foi usado o fator de capacidade. O fator de capacidade de uma estação de geração de energia elétrica é a proporção entre a produção efetiva da usina em um período e a capacidade total máxima neste mesmo período (HOFFMANN et al., [s.d.]). O fator de capacidade de 2014, 2015 e 2016 foram obtidos por dados do Ministério de Minas e Energia (MME) e são respectivamente 66%; 65% e 40% (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2016). Através dos dados de fator de capacidade foi calculada quantidade de energia gerada pelos geradores nos anos de 2014, 2015 e 2016 utilizando a Equação 1.

$$Q = FC \times P \times 8760 \quad \text{Equação 1}$$

Sendo Q, FC e P a quantidade de energia gerada (kW/ano), o fator de capacidade e a Potência instalada (kW) e o valor 8760 é o número de horas no ano, respectivamente.

3.6 Cálculo do volume de combustível.

Os dados da ANEEL não trazem o volume de combustível usado em cada central geradora de energia, assim o volume foi calculado com o auxílio dos dados da ELETROBRAS e as etapas citadas a seguir.

O coeficiente de consumo específico de combustível, também conhecido como *Break Specific Fuel Consumption* (B.S.F.C) (g/kWh) é a eficiência com que o motor transforma energia química do combustível em trabalho útil. De posse dos valores de consumo de combustível e a energia gerada (Q), é possível calcular esse coeficiente através da Equação 2.

$$(B.S.F.C) = \frac{\rho \times V}{Q} \quad \text{Equação 2}$$

Onde ρ , V e Q são a massa específica do combustível (kg/m^3), o volume de combustível utilizado em metros cúbicos e a quantidade de energia gerada no ano, respectivamente.

A Eletrobrás disponibiliza dados mensais de geração energética e consumo de combustível de alguns geradores da região norte. Assim, com esses dados foi possível calcular um consumo específico médio para os geradores do quadrante selecionado.

Todos os geradores selecionados utilizam o óleo diesel como combustível e apresentam massa específica (ρ) do óleo diesel a 20°C , segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP) entre 820 a 880 kg/m^3 . Sendo assim foi selecionado o valor de 850 kg/m^3 para o cálculo do consumo específico (ANP, 2010).

Com o valor médio de BSFC para os motores a diesel, a equação foi novamente utilizada, agora aplicando a quantidade de energia gerada (w) para os geradores da ANEEL (equação 1), obtendo o volume de combustível que cada gerador utilizou.

3.7 Cálculo da emissão de enxofre

A emissão de enxofre dependerá da composição do combustível utilizado (y). Segundo o site da ANP (Agência Nacional de Petróleo) o diesel utilizado para geração de energia elétrica é o s1800 (1800 ppm , ou 1800 mg kg^{-3}), o que não limita as geradoras de utilizarem outros tipos de diesel, como o s500 (500 ppm , ou 500 mg kg^{-1}). Como o tipo do diesel utilizado não é discriminado pelas centrais geradoras, este estudo considerou dois cenários para o cálculo das emissões, o primeiro, com todas os geradores utilizando o diesel s1800 e o segundo, com todos utilizando o diesel s500. Foi utilizada a equação 3 para calcular a emissão de S:

$$E = V \times \rho \times y \quad \text{Equação 3}$$

Onde V é o volume de combustível utilizado em metros cúbicos, ρ (kg/m^3) é a densidade do diesel adotada neste estudo, y é a quantidade de enxofre em kg por kg de diesel e “E” a quantidade de enxofre emitido em quilogramas.

3.8 Softwares para análise de dados

O software ArcGIS 10.3 foi usado para a manipulação dos dados da ANEEL. Os geradores foram plotados no mapa base do Brasil, o sistema de projeção escolhido foi o UTM e o Datum, SIRGAS 2000.

Além disto, informações de trajetória dos ventos foram obtidas através do modelo de trajetórias online HYSPLIT, disponível no site da NOAA (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>, (NOAA, 2018). As retro-trajetórias foram calculadas com duração de 48 horas, em três diferentes altitudes (500, 1000 e 1500 m) com chegada às 00:00 (GMT) na estação do ATTO durante o mês de setembro (estação seca). O modelo gera um arquivo com formato SHP, que pode ser utilizado no software ArcGIS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Consumo de diesel pelos geradores

A região Norte é caracterizada na base de dados da Eletrobrás com o consumo mensal de diesel, o que possibilita ilustrar a sazonalidade do consumo do mesmo nas estações seca e chuvosa (figura 4). Observa-se um claro aumento no consumo de combustível pelos geradores na estação seca em relação a chuvosa na região norte. Em 2013, este aumento foi de 18,8%, em 2014 de 11,7%, em 2015 de 20% e em 2016 de 9%. Essa sazonalidade pode ser explicada pelo aumento da atividade humana na estação seca, o que demanda maior produção e consumo de energia. Na estação chuvosa muitas regiões são alagadas, outras ficam inacessíveis ou com acesso restrito, as atividades econômicas são reduzidas e conseqüentemente, a demanda por energia diminui. Além disto, as elevadas temperaturas do ar durante a estação

seca também demandam maior uso de energia em aparelhos de ar condicionado e chuveiros elétricos.

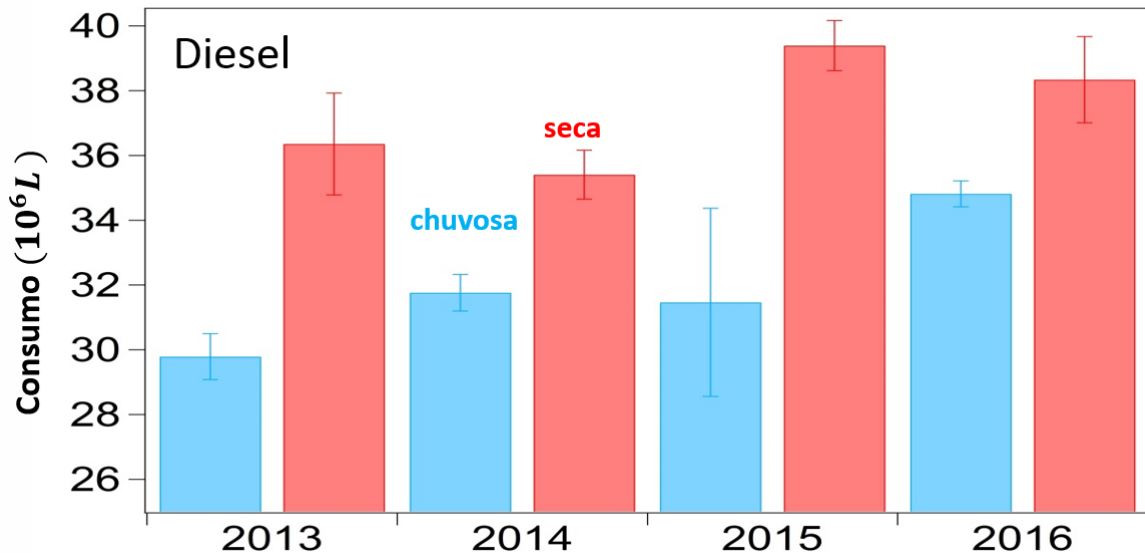


Figura 4 - Consumo de diesel de geradores da região norte nas estações secas e chuvosas, conforme disponibilizado pela Eletrobrás.

Em toda região Norte, contemplando os estados de Amapá, Pará, Rondônia, Amazonas, Acre, Tocantes e Roraima, estão catalogadas na base de dados da ANEEL 3410 pequenas centrais geradoras de energia, sendo 2931 dessas unidades em efetiva operação.

Observa-se na figura 5 que, para a geração de energia elétrica, o diesel é preferencialmente utilizado pelos sistemas isolados dentre os combustíveis fósseis disponíveis, atingindo 49,5% em 2014 e 60% em 2015. Deste modo percebemos a relevância da queima de diesel na região Norte do Brasil. O gás natural também é largamente utilizado, porém em regiões isoladas, o acesso a essa fonte de combustível é dificultado, aumentando a adesão do uso de diesel nas pequenas centrais geradoras de energia. Nota-se também uma alta flutuação nas porcentagens de uso dessas fontes de 2014 para 2015, isso pode indicar uma adaptação ao mercado econômico, onde os administradores mudam suas fontes energéticas de acordo com a disponibilidade do mercado e a flutuação do preço e também um crescente número de novas centrais geradoras se instalando na região.

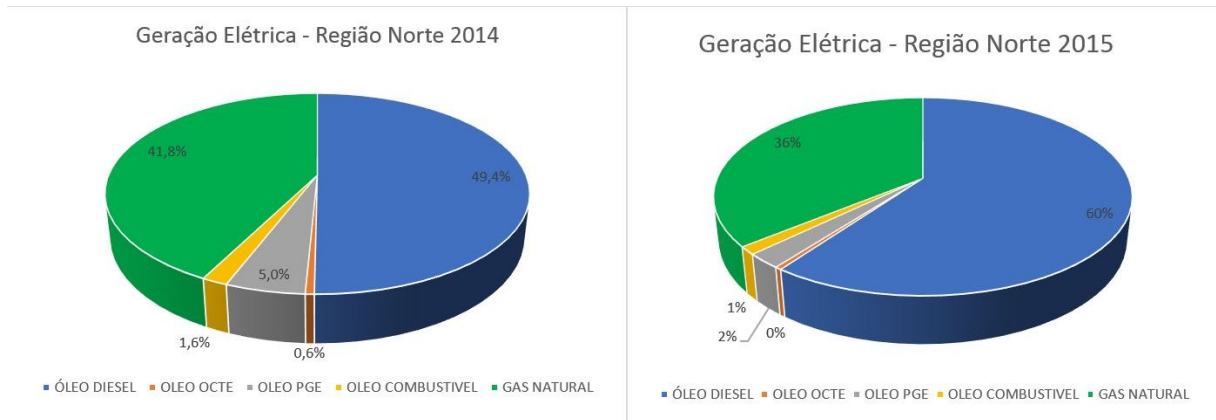


Figura 5 - A porcentagem de utilização do diesel em relação a outros combustíveis fósseis para geração de energia elétrica na região Norte nos anos de 2014 e 2015, conforme dados da Eletrobrás.

4.2 Trajetórias de massas de ar

As trajetórias de ar que chegam no ATTO foram simuladas pelo HYSPLIT para os meses de maiores concentrações de aerossol na atmosfera na bacia central da floresta amazônica (agosto-outubro). Os resultados mostram a predominância de massas de ar vindas do Leste e Nordeste (figura 6) em diferentes altitudes (500, 100 e 1500 m). Este padrão encontrado está em acordo com Andreae et al., 2015. Polhker et al. 2017 mostram que nestes meses do ano, a posição da ITCZ faz com que os ventos que chegam na bacia central amazônica venham predominantemente do Oceano Atlântico e África sul.

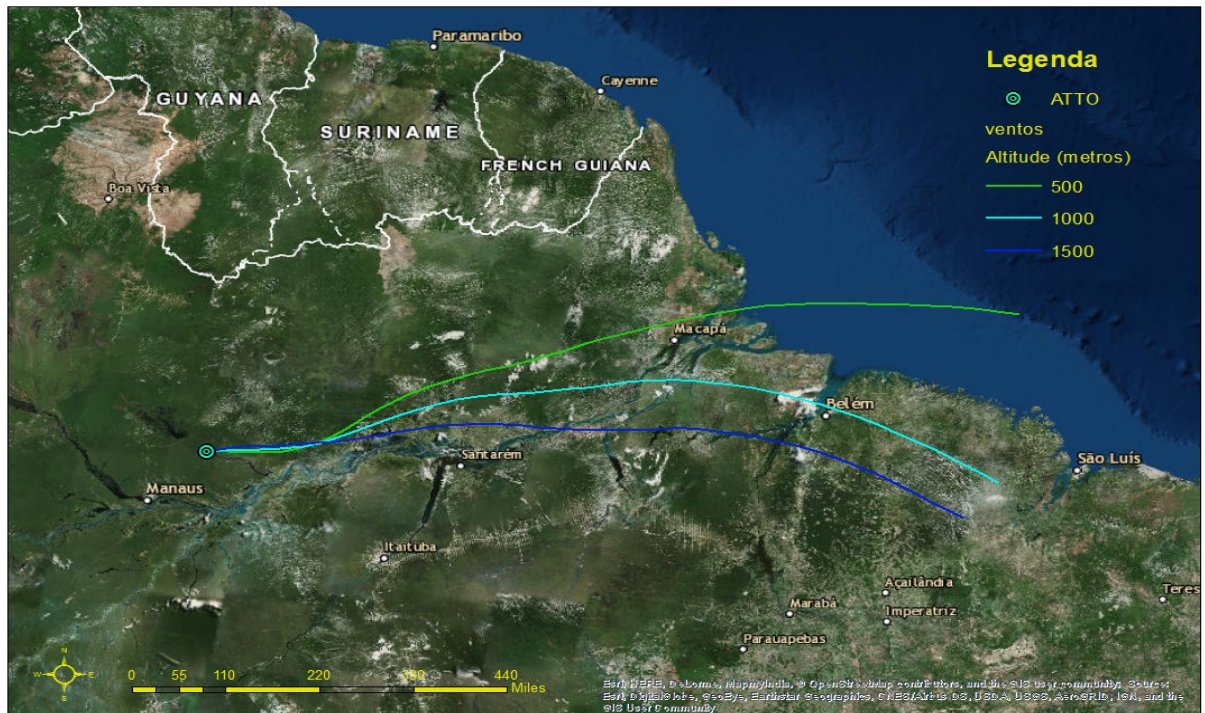


Figura 6 – Simulação da trajetória das massas de ar que chegam no ATTO no dia 15 de setembro de 2014, para diferentes altitudes e com 48 horas.

A figura 7 mostra as direções das massas de ar incidentes na região do ATTO e a figura 8, a frequência dessas incidências de acordo com a época do ano. Assim, observamos que nos meses de agosto a outubro, na estação seca, cerca de 50% das massas de ar que chegam ao ATTO vem principalmente de nordeste (E1, E2, E3 e E4, PÖHLKER et al., 2018). Isso porque, com a chegada da estação seca, a Zona de Convergência Intertropical desloca-se para o Norte, favorecendo as correntes provenientes do oceano Atlântico e dificultando a incidência das correntes ESE1, ESE2 e ESE3 que juntas somam apenas cerca de 10% da incidência e carregam consigo uma carga de material particulado proveniente das queimadas e da ação antrópica que age sobre o território continental. Observa-se ainda que durante os meses de agosto a outubro as massas de ar apresentam trajetórias muito próximas à presença dos geradores da região norte, o que pode trazer parte dos poluentes emitidos pelas mesmas para a bacia central da floresta e próximo à estação ATTO.

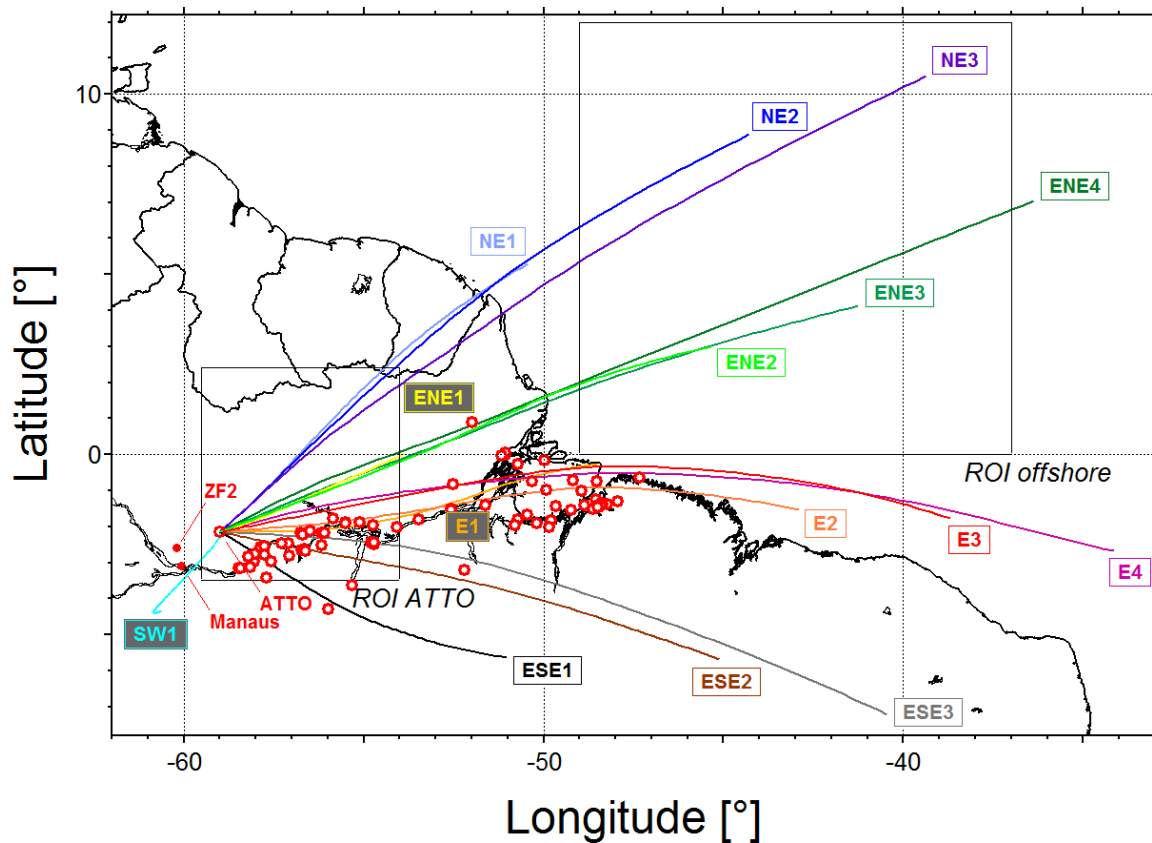


Figura 7 Direções mais prováveis das massas de ar incidentes no ATTO e os sistemas isolados representados por círculos vermelhos. Adaptado de Pöhlker et al. (2018)

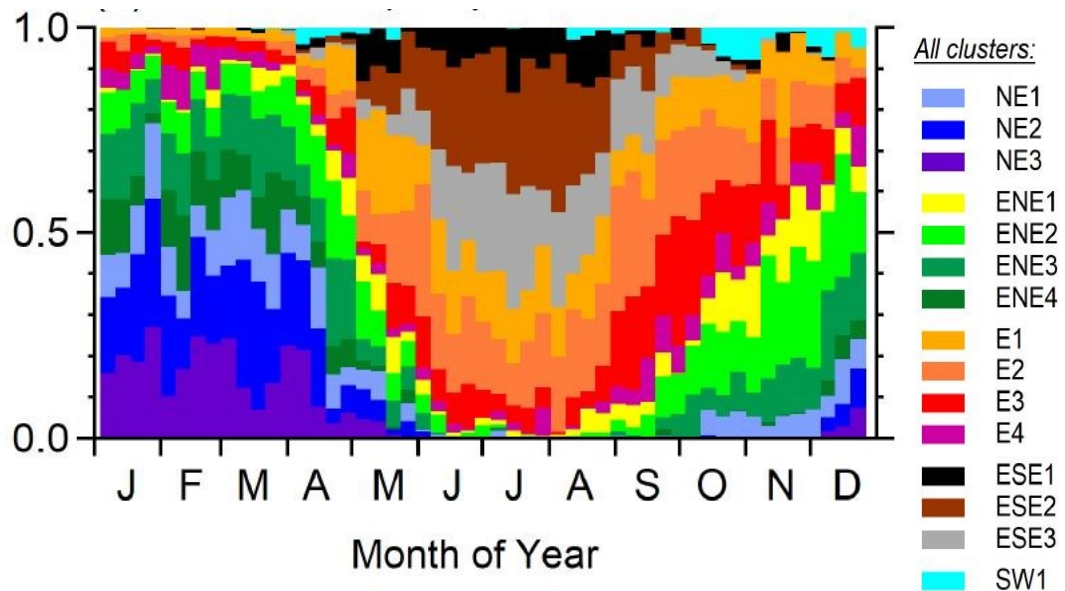


Figura 8 Frequência anual da incidência das massas de ar no ATTO. Fonte Pöhlker et al. (2018)

Para estudar com melhor detalhe as emissões dos sistemas isolados foi delimitado um quadrante contendo a área de estudo (figura 9), onde os aerossóis provenientes da queima de combustíveis fósseis de geradores são transportados e,

possivelmente detectados pelos equipamentos instalados no ATTO. Na figura 9 estão representadas as centrais geradoras de energia, a direção predominante das massas de ar e o quadrante selecionado para o estudo.

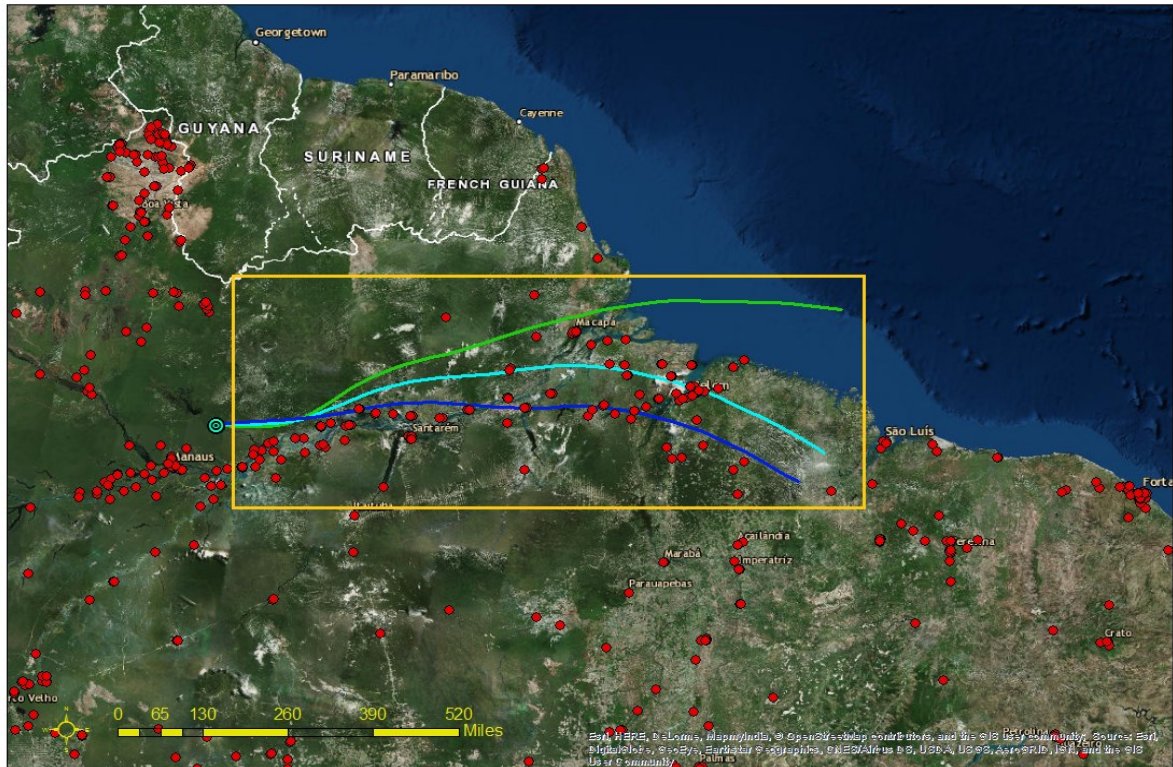


Figura 9 - Quadrante delimitando a área de estudos em amarelo, centrais geradoras representadas por pontos vermelhos e a direção do vento no dia 15 de setembro por linhas verdes e azuis.

As centrais geradoras de energia presentes no quadrante estão listadas na tabela A1. Ao todo são 138 pequenas centrais geradoras, sendo 104 em operação até 2016. Dentre as operantes, duas utilizam carvão mineral, três utilizam óleo combustível e apenas 4 utilizam gás natural, o restante, 95 centrais, fazem o uso do diesel para geração de energia elétrica. 27 centrais se localizam no estado de Amazonas, 7 no estado do Amapá e 104 no estado do Pará.

Apesar da utilização de combustíveis fósseis nos geradores ser balanceada entre gás natural e diesel, nota-se que os geradores do quadrante de estudo são majoritariamente movidos a óleo diesel. Esse fato pode ser explicado pelo difícil acesso à região, que leva os gestores a escolher um combustível mais fácil de ser transportado e comercializado. Também pode-se observar uma grande parcela das centrais geradoras de energia ainda em processo de construção, cerca de 25%, o que aponta para um possível aumento de emissões de poluentes para a atmosfera nessa região nos próximos anos.

4.3 Emissão de enxofre

A média do Consumo Específico (B.S.F.C) dos geradores foi calculado (equação 2) para o ano de 2013, 2014, 2015 e 2016 obtendo os respectivos valores de 234,9; 224,1; 238,1 e 234,5 g/kWh. O valor médio de consumo específico para os quatro anos foi de 232,9 g/kWh.

Através do valor médio de Consumo Específico (B.S.F.C) dos motores das centrais geradoras da região norte foi possível estimar o volume de combustível utilizado pelos geradores selecionados no quadrante. Aplicou-se a equação novamente, multiplicando os valores de geração de energia anual para cada central (equação 1), obtendo assim o volume de combustível utilizado por ano, por cada central elétrica no quadrante.

Com a quantidade de combustível utilizado por ano em cada central geradora, foi calculado a emissão de cada uma, através de equação 3 e o total anual calculado com o somatório do resultado de todas os geradores individualmente. As estimativas de emissão de enxofre e consumo de combustível totais para o ano de 2014, 2015 e 2016 estão dispostas na tabela 2 e Figura 10.

Tabela 2 - Resultado do cálculo da estimativa do consumo de combustível e emissão de enxofre pelos geradores da região de estudo nos anos de 2014, 2015 e 2016.

	2014	2015	2016
Consumo de óleo diesel (m³)	779.011,5	790.996,3	479.391,7
Emissão de Enxofre	2014	2015	2016
Diesel s500 (T)	331,1	336,2	203,7
Diesel s1800 (T)	1.191,9	1.210,2	733,5

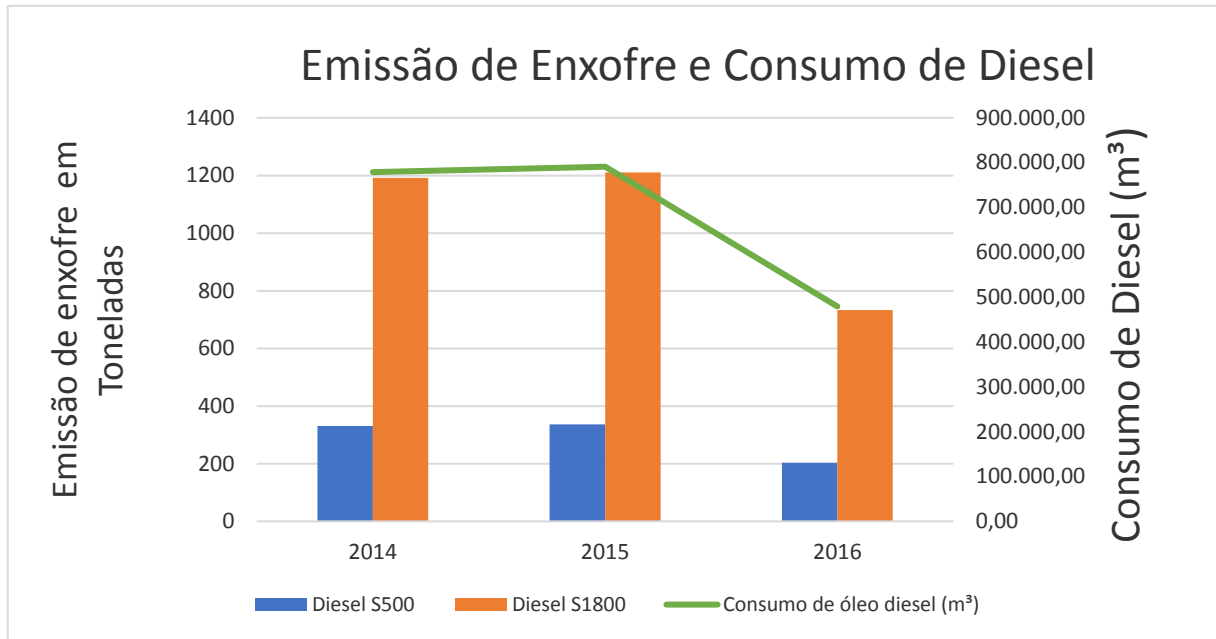


Figura 10 - estimativas do consumo de combustível e emissões de enxofre para o ano de 2014, 2015 e 2016 emitidos pelos geradores do quadrante selecionado.

Os resultados das estimativas da emissão de enxofre para os anos de 2014 e 2015 são valores semelhantes, já no ano de 2016 observamos uma queda significativa desses valores. O fator de capacidade para o ano de 2016 foi de 0,4 - o menor dentre os anos trabalhados e que certamente provocou a queda nos resultados de consumo e emissão obtidos. A queda no fator de capacidade pode indicar uma influência direta do setor econômico, ou seja, uma recessão econômica poderia diminuir a demanda energética e conseqüentemente, o consumo de combustível e as emissões de enxofre. A recessão iniciada no segundo trimestre de 2014 teve seus maiores efeitos no segundo trimestre de 2016 onde as tarifas de energia elétrica, que haviam sido reduzidas em 2013, foram reajustadas em cerca de 50% (OREIRO, 2017).

As estimativas anuais e individuais de cada gerador encontram-se na figura 11, onde o tamanho do marcador indica a quantidade de enxofre emitido para a atmosfera no ano de 2015 em toneladas. As pequenas centrais geradoras com maior emissão (15 – 100 toneladas) encontram-se principalmente próximas às cidades de Belém, Santarém, Parintins, Manaus e às margens do Rio Amazonas e juntas totalizaram 131,96 toneladas de S, considerando o uso de S500.

Todas os 95 geradores presentes no quadrante de estudo totalizaram 336,2 toneladas de enxofre emitidas para a atmosfera da floresta amazônica no ano de 2015 utilizando o diesel s500 e 1.210,2 toneladas utilizando o diesel S1800.

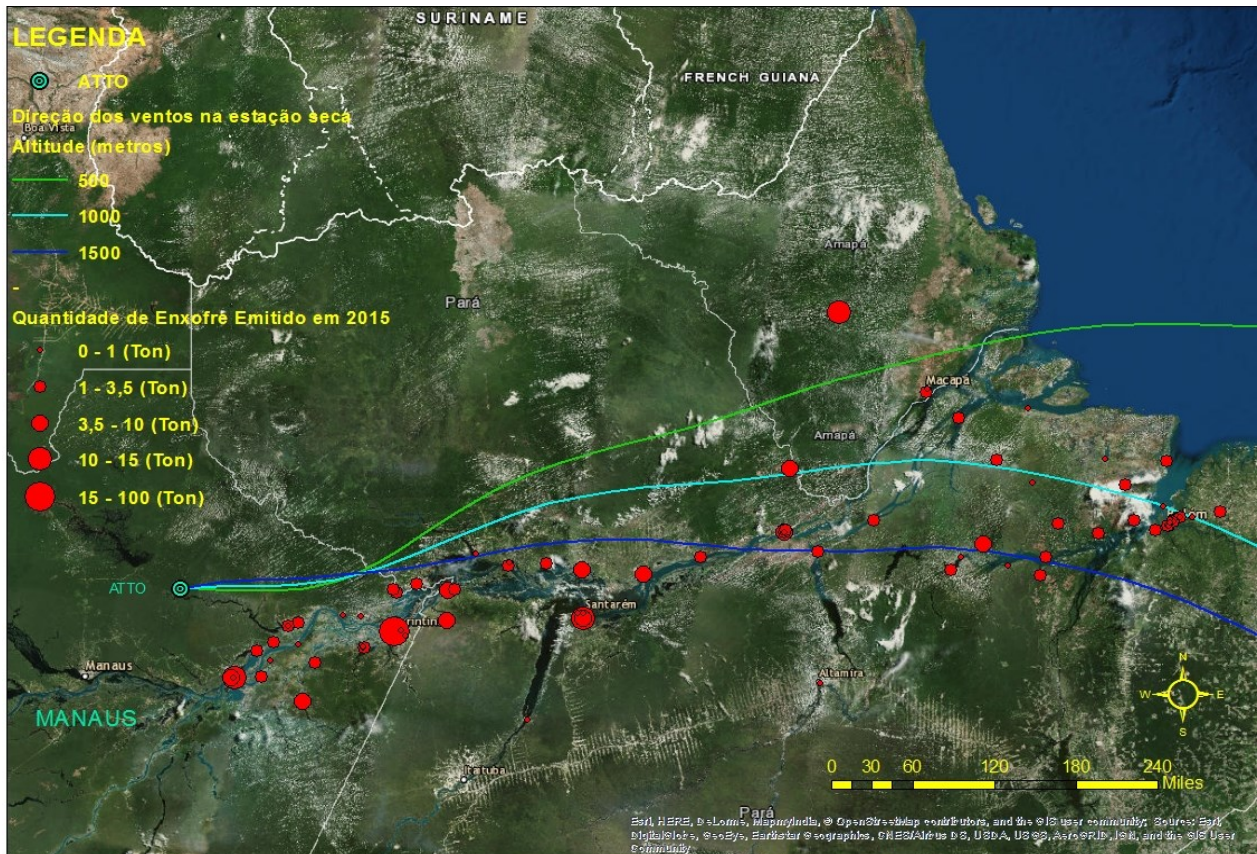


Figura 11 – representação visual dos geradores à diesel por faixas graduais de tamanho de acordo com a quantidade de emissão de enxofre estimada.

4.4 Medidas de sulfato em aerossóis atmosféricos

A concentração atmosférica de sulfato medida do ATTO é mostrada através de médias mensais para os anos de 2014, 2015 e 2016, figura 12. Observa-se picos de sulfato nas estações secas, chegando a $2,4 \mu\text{g m}^{-3}$ em 2014, $1,9 \mu\text{g m}^{-3}$ em 2015 e $0,9 \mu\text{g m}^{-3}$ em 2016. Elevadas concentrações de aerossóis são normalmente observadas nesta estação devido o aumento das atividades antropogênicas, tais como queimadas (Artaxo et al., 2005 , Andreae et al., 2015). Este resultado está em acordo com o consumo de diesel sazonal de toda região norte, com maior consumo nos meses da estação seca (figura 4). A soma das concentrações de aerossóis de sulfato na moda fina para os anos de 2014, 2015 e 2016, mostra que os mesmos diminuíram aproximadamente 50% neste período (figura 13). Padrão semelhante é observado no consumo de diesel e na emissão de enxofre para a atmosfera dentro da região de estudo (figura 13). Essa diminuição pode estar relacionada a eventos climáticos, tais como influência do Oscilação Sul El Niño o qual foi responsável por

diminuir os padrões de precipitação na bacia amazônica no anos de 2014 e 2015 (<https://www.ncdc.noaa.gov>). Embora as variáveis apresentem comportamento parecido (figura 13), ou seja de diminuição ao longo do tempo, não foi observada interferência direta das emissões dos sistemas isolados nas medidas de aerossóis de sulfato. No entanto, é possível que o uso de combustíveis com elevados teores de enxofre estejam interferindo na concentração *background* de enxofre na bacia amazônica.

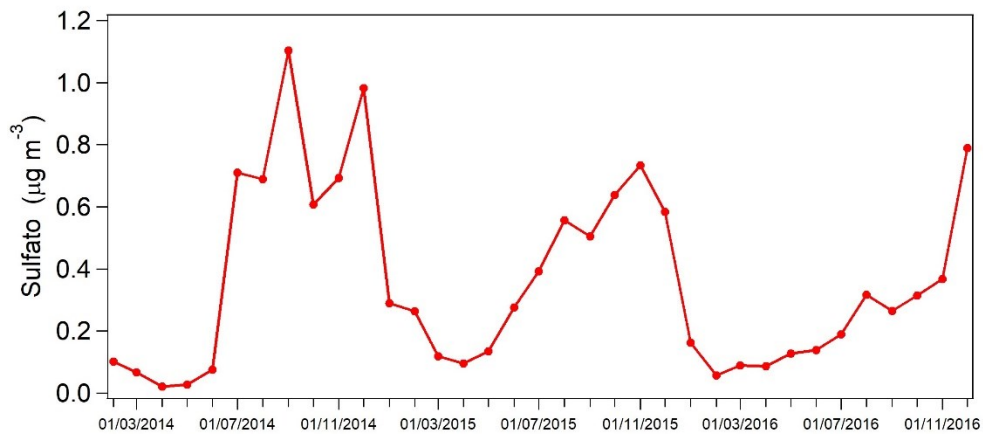


Figura 12 – Médias mensais de aerossóis de sulfato medidos na estação ATTO.

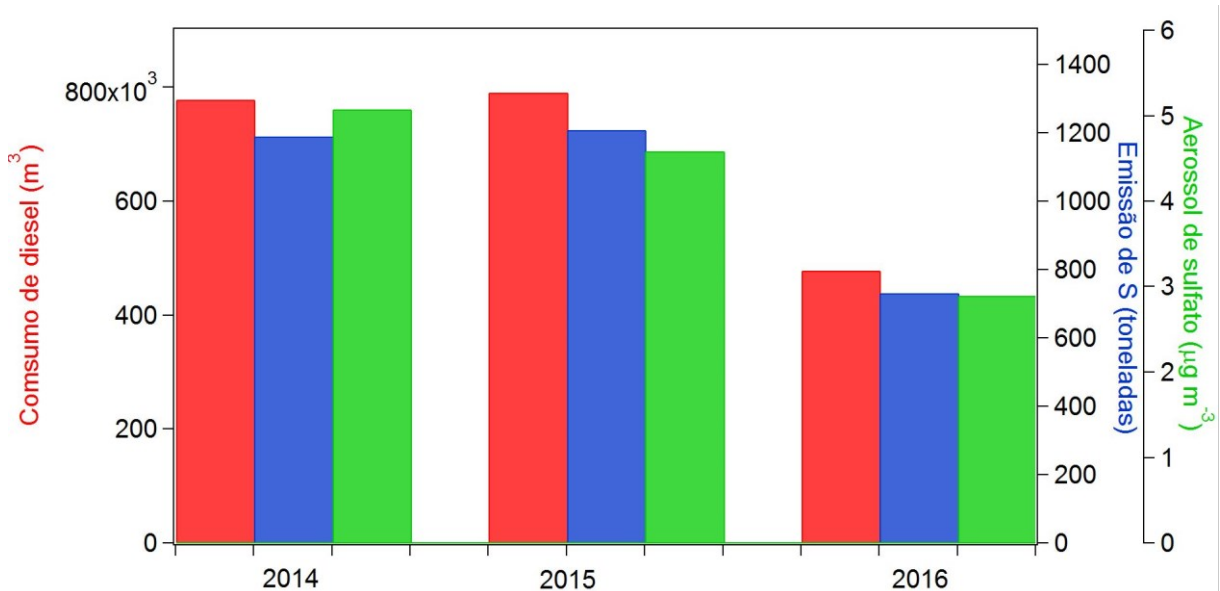


Figura 13 – Médias anuais de consumo de diesel, emissão de enxofre e medidas de aerossóis de sulfato na torre ATTO.

5 CONCLUSÃO

Durante a estação seca os ventos que trazem as massas de ar para dentro da bacia central da floresta Amazônica, tal como para a estação ATTO, vindo, principalmente de leste e nordeste. Neste percurso observa-se a presença de 95 unidades geradoras de energia elétrica (sistemas isolados) que utilizam principalmente diesel como combustível. Este trabalho mostrou que a quantidade de enxofre emitida por estas unidades geradoras apresenta forte caráter sazonal (maior na estação seca) e depende fortemente do tipo de diesel utilizado. Foram estimados dois cenários, no pior deles, onde todas as centrais utilizam o diesel s1800 no processo de geração de energia, 3.135,6 toneladas de enxofre foram emitidas de 2014 a 2016 na região de estudo da bacia amazônica. No melhor cenário, (s500) 871 toneladas foram emitidas no mesmo período. É possível que o pior cenário seja realístico, visto que o teor de enxofre no diesel não é regulado pela ANP, nem padronizado pelas centrais geradoras de energia.

Há uma relação positiva entre os níveis de emissão de enxofre pelos geradores selecionados e as concentrações de sulfato medidos na estação ATTO. Assim, é possível que as emissões de enxofre dos geradores do quadrante possam aumentar a concentração *background* de enxofre, e conseqüentemente, de aerossóis de sulfato da região. No entanto, não foi verificado impacto direto, em termos de aumento de aerossóis de sulfato no ATTO.

Dados como a geração mensal, o tipo de motor gerador, as características do diesel utilizado e o Fator de Emissão individual de cada usina são de grande importância para uma estimativa mais precisa das emissões. Na falta desses dados a metodologia utilizou de médias anuais que podem não retratar as reais características dessas centrais e distanciar os resultados de estimativa de emissão do cenário real.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A deposição seca dos poluentes não foi abordada neste estudo. Trabalhos futuros poderiam focar nos padrões de deposição seca dos poluentes emitidos pelos geradores da região. Através de modelagem matemática entenderíamos melhor a

dinâmica de transporte e deposição dos poluentes dispersos na região pelas pequenas centrais geradoras de energia.

A energia solar é uma alternativa limpa para a obtenção de energia elétrica em áreas isoladas do Sistema Interligado Nacional. Seria interessante um estudo sobre a viabilidade econômica da substituição dos geradores à diesel na região amazônica por sistemas fotovoltaicos ou pequenas usinas solares de geração de energia.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família por fazer possível minha graduação.

Agradeço à minha orientadora Samara Carbone pela imensa solicitude que sempre me atendeu, por suas preciosas orientações e toda sua atenção despendida neste trabalho.

Agradeço ao Doutorando Adan Medeiros do Programa de Pós-Graduação de Clima e Ambiente no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (CLIAMB/INPA) por compartilhar informações a respeito dos sistemas isolados da região Norte.

Agradeço à Eletrobrás por fornecer os dados dos sistemas isolados, em especial ao Mario Antônio F. Rodrigues, da Coordenação da Operação e Manutenção da Geração – DGCO

Agradeço a ANEEL por todos os dados disponibilizados no portal eletrônico e que possibilitaram a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Utilização de combustível**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>.

ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: Perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Química Nova**, v. 28, n. 5, p. 859–870, 2005.

ANDREAE, M. O. et al. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres**, v. 107, n. 20, 2002.

ANDREAE, M. O. Aerosols Before Pollution. **Science**, v. 315, n. 5808, p. 50 LP-51, 5 jan. 2007.

ANDREAE, M. O. et al. The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): overview of pilot measurements on ecosystem ecology , meteorology , trace gases , and aerosols. n. April, p. 10723–10776, 2015.

ANEEL. **SIGEL - Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-geograficas>>.

ARTAXO, P. et al. Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 185–196, 2005.

DAVIDSON, E. A.; ARTAXO, P. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: Results of the large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 519–529, 2004.

ELETROBRAS. **Relatório anual de geração de energia**.

HOFFMANN, S. et al. Simulação dos impactos da implantação de sistemas de captura de CO₂ sobre os custos, a geração de resíduos eo consumo de H₂O de termelétricas a carvão. **Portalsatc.Com**, v. 2, n. Ci, [s.d.].

MALHI, Y. et al. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169 LP-172, 11 jan. 2008.

MARTIN, S. T. et al. SOURCES AND PROPERTIES OF AMAZONIAN AEROSOL PARTICLES. n. 2008, 2010.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. **Capacidade Instalada de Geração Elétrica**. [s.l: s.n.].

NOAA. **National Center for Environmental Information**. Disponível em:

<<https://www.ncdc.noaa.gov>>.

OREIRO, J. L. A grande recessão brasileira: diagnóstico e uma agenda de política econômica. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 75–88, 2017.

PÖHLKER, C. et al. Land cover and its transformation in the backward trajectory footprint region of the Amazon Tall Tower Observatory. n. June, 2018.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **ATMOSPHERIC From Air Pollution to Climate Change SECOND EDITION**. [s.l: s.n.].

SILVA, T. E. P. et al. Enxofre : Um Poluente Em Potencial Na Composição Do Óleo Diesel Brasileiro . **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, p. 1–6, 2013.

SOARES-FILHO, B. S. et al. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, p. 520, 23 mar. 2006.

ANEXOS

Tabela A1 - Geradores selecionados, localização, a situação operacional e o combustível utilizado.

n°	NOME	UF	ESTAGIO	TIPO_COMB	Potencia kW
1	Urucuntuba (Tabocal)	AM	Operação	Óleo Diesel	2370
2	Nhamundá	AM	Operação	Óleo Diesel	2500
3	Yamada Plaza Castanhal	PA	Operação	Óleo Diesel	2392
4	Aveiro	PA	Operação	Óleo Diesel	624
5	Porto de Moz - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	7614
6	Gurupá - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	5376
7	Magalhães Barata	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	300
8	DTCEA-SN	PA	Operação	Óleo Diesel	528
9	GPSA	PA	DRO	Gás Natural	1280000
10	Lindóia	AM	Operação	Óleo Diesel	320
11	Prainha	PA	Operação	Óleo Diesel	2608,8
12	Cachoeira do Arari	PA	Operação	Óleo Diesel	1728
13	Alenquer - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	16074
14	DTCEA-MQ	AP	Operação	Óleo Diesel	528
15	São Miguel	PA	Operação	Óleo Diesel	259,2
16	Chaves	PA	Operação	Óleo Diesel	584
17	Allamira	PA	Operação	Óleo Diesel	80
18	DTCEA-BE	PA	Operação	Óleo Diesel	528
19	Yamada Cidade Nova	PA	Operação	Óleo Diesel	1232,65
20	Óbidos	PA	Operação	Óleo Diesel	4800
21	BLM QB	PA	Operação	Óleo Diesel	720
22	Breves	PA	Operação	Óleo Diesel	8000
23	Freguesia do Andará	AM	Construção não iniciada	Óleo Diesel	80
24	Hermasa	AM	Operação	Óleo Diesel	7590
25	Pedras	AM	Operação	Óleo Diesel	432
26	Muaná - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	5750
27	Santa Cruz do Arari - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	1280
28	Barreira do Andará	AM	Operação	Óleo Diesel	80
29	Fordlândia	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	960
30	Alcoa Porto	PA	Operação	Óleo Diesel	5644
31	Condomínio Edifício Pátio Belém	PA	Operação	Óleo Diesel	1280
32	Soure - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	7000
33	Itapeaçu	AM	Operação	Óleo Diesel	789
34	Portel	PA	Operação	Óleo Diesel	4188
35	Chaves - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	1440
36	F PIO Lojas Visão Belém	PA	Operação	Óleo Diesel	1524
37	Yamada Jaderlândia	PA	Operação	Óleo Diesel	637,5
38	Boulevard Belém	PA	Operação	Óleo Diesel	4440
39	Bagre	PA	Operação	Óleo Diesel	1222
40	Oeiras do Pará - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	4977
41	Itapiranga	AM	Operação	Óleo Diesel	3073
42	Amapá Garden Shopping	AP	Operação	Óleo Diesel	4600
43	São Camilo	PA	Operação	Óleo Diesel	192
44	Trombetas	PA	Operação	Óleo Diesel	40
45	Boa Vista do Ramos	AM	Operação	Óleo Diesel	2582
46	Santa Cruz do Arari	PA	Operação	Óleo Diesel	720
47	Cotijuba - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	2500
48	DTCEA-TS II	PA	Operação	Óleo Diesel	40
49	Almeirim	PA	Operação	Óleo Diesel	4132,8
50	Aveiro - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	1120
51	Prainha - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	4500
52	Muaná	PA	Operação	Óleo Diesel	3408
53	Macapá	AP	Construção não iniciada	Óleo Diesel	1500
54	Melgaço	PA	Operação	Óleo Diesel	720
55	São Sebastião do Uatumã	AM	Operação	Óleo Diesel	2334
56	Yamada Ananindeua	PA	Operação	Óleo Diesel	860
57	Yamada Pres. Vargas	PA	Operação	Óleo Diesel	260
58	Curralinho	PA	Operação	Óleo Diesel	2601,6
59	Serra do Navio	AP	Operação	Óleo Diesel	21600
60	Juruti - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	15228
61	Gurupá	PA	Operação	Óleo Diesel	2584,8
62	Caíma	PA	Operação	Óleo Diesel	4920
63	Condomínio do Castanheira Shopping Center	PA	Operação	Óleo Diesel	2560
64	Curuá	PA	Operação	Óleo Diesel	1653,6
65	Shopping Castanheira	PA	Operação	Óleo Diesel	4352
66	Silves	AM	Operação	Óleo Diesel	2622
67	Amapá Genpower	AP	DRO	Carvão Mineral	600000

n°	NOME	UF	ESTAGIO	TIPO_COMB	Potencia kW
68	Cachoeira do Arari – CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	2400
69	Yamada Cabanagem	PA	Operação	Óleo Diesel	565,5
70	Santana do Uatumã	AM	Operação	Óleo Diesel	80
71	São Sebastião da Boa Vista	PA	Operação	Óleo Diesel	2088
72	Ulianópolis	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	1800
73	Monte Alegre - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	13536
74	Parintins	AM	Operação	Óleo Diesel	29550
75	Paragominas I	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	1200
76	Monte Dourado	PA	Operação	Óleo Diesel	4200
77	Supermercado Amazônia Senador Lemos	PA	Operação	Óleo Diesel	129,22
78	Zé Açú	AM	Operação	Óleo Diesel	200
79	Santana	AP	Operação	Óleo Diesel	177740
80	Faro	PA	Operação	Óleo Diesel	2565,6
81	Alenquer	PA	Operação	Óleo Diesel	7972
82	Vila Augusto Monte Negro	AM	Operação	Óleo Diesel	450
83	Cará Açú	AM	Construção não iniciada	Óleo Diesel	120
84	Benevides	PA	Operação	Óleo Diesel	128
85	Assembleia Paraense	PA	Operação	Óleo Diesel	1524
86	Cotijuba	PA	Operação	Óleo Diesel	1145
87	Monte Alegre	PA	Operação	Óleo Diesel	10757
88	Ceiras do Pará	PA	Operação	Óleo Diesel	2168
89	Moju	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	420
90	DTCEA-TS	PA	Operação	Óleo Diesel	612
91	Salvaterra	PA	Operação	Óleo Diesel	4059
92	Socic Belém	PA	Operação	Óleo Diesel	240
93	Almeirim - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	6542
94	Supermercado Amazônia Alcindo Caceia	PA	Operação	Óleo Diesel	738
95	Juruti	PA	Operação	Óleo Diesel	5026
96	Salvaterra - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	8750
97	SRM-SP	PA	Operação	Óleo Diesel	0,18
98	Supermercado Amazônia Almirante Barroso	PA	Operação	Óleo Diesel	405
99	Caburi	AM	Operação	Óleo Diesel	753
100	Uatumã	AM	DRO	Gás Natural	156000
101	São Sebastião da Boa Vista – CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	5280
102	Mazagão	AP	Construção não iniciada	Óleo Diesel	568
103	Vila Amazônia	AM	Operação	Óleo Diesel	710
104	Laranjal do Jari	AP	Operação	Óleo Diesel	8675
105	Yamada Salinas	PA	Operação	Óleo Diesel	667,5
106	Albrás	PA	Operação	Óleo Diesel	4850
107	Santarém	PA	Operação	Óleo Diesel	18750
108	Itacoatiara	AM	Operação	Óleo Diesel	20640
109	Faro - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	2550
110	Ocim	PA	Operação	Óleo Diesel	2736
111	Yamada Jurunas	PA	Operação	Óleo Diesel	830
112	Afuá	PA	Operação	Óleo Diesel	2872,8
113	Quatro Bocas	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	2300
114	Shopping Center Iguatemi Belém	PA	Operação	Óleo Diesel	2960
115	Urucará	AM	Operação	Óleo Diesel	3750
116	Munguba	PA	Operação	Óleo Diesel	8000
117	Porta de Pedras	PA	Operação	Óleo Diesel	2659,2
118	Anajás	PA	Operação	Óleo Diesel	1112
119	Yamada Pátio Belém	PA	Operação	Óleo Diesel	1025
120	Azulão	AM	DRO	Gás Natural	102739
121	Mocambo	AM	Operação	Óleo Diesel	372
122	MRN UG I (Antiga Porto Trombetas)	PA	Operação	Óleo Combustível	15300
123	Alcoa Beneficiamento	PA	Operação	Óleo Diesel	9828
124	Barreirinha	AM	Operação	Óleo Diesel	2982
125	Santarém	PA	Operação	Óleo Diesel	18750
126	Afuá - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	4787
127	Maués	AM	Operação	Óleo Diesel	7350
128	MRN UG II	PA	Operação	Óleo Combustível	45800
129	Cametá	AM	Operação	Óleo Diesel	429
130	Terra Santa	PA	Operação	Óleo Diesel	3648,8
131	Terra Santa – CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	5052
132	Soare	PA	Operação	Óleo Diesel	4270,4
133	Porto de Moz	PA	Operação	Óleo Diesel	2566
134	Cadam	PA	Operação	Óleo Combustível	24992
135	Barra do Riacho Norte	PA	DRO	Gás Natural	951180
136	Vila dos Palmares	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	200
137	Alunorte	PA	Operação	Carvão Mineral	103854
138	Anajás - CEPA	PA	Construção não iniciada	Óleo Diesel	3400

