

Estudo do custo social dos impactos à saúde oriundos das emissões da termelétrica a gás natural na região de Ibirité

RESUMO

Bianca F. Capistrano
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Departamento de Engenharia Nuclear, Escola de Engenharia - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Fidélis B. G. L. e Estanislau
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Departamento de Engenharia Nuclear, Escola de Engenharia - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Carlos E. Velasquez
carlosvelcab@nuclear.ufmg.br
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Departamento de Engenharia Nuclear, Escola de Engenharia – Av. Antônio Carlos 6627, Boco 4, CEP:31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

A matriz elétrica Brasileira apesar de ser predominante hidroelétrica (64,9%), ao redor de 13% da matriz é composta por termelétricas a combustível fóssil, sendo a contribuição a gás natural maior parte com 8,3%. Segundo diversos estudos a emissão de poluentes é um dos principais responsáveis pelas mudanças climáticas além de ser responsável por diversos problemas respiratórios de habitantes ao redor da termelétrica. Neste cenário, encontra-se a termelétrica localizada no município de Ibirité/MG, que utiliza como fonte de energia o gás natural e possui uma capacidade de geração de 226 MW. O presente trabalho realiza uma aproximação dos impactos à saúde por doenças respiratórias e cardiovasculares ocasionadas pelas emissões de poluentes ao redor de uma usina termelétrica a gás natural na região metropolitana de Ibirité, quantificando monetariamente os custos de tratamento médico necessário para estas doenças. Para isto é necessário considerar algumas características particulares da região como os dados geográficos e meteorológicos. Assim como também os dados de operação da usina termelétrica para geração de energia elétrica para poder estimar as emissões produzidas. Para obter os resultados dos impactos gerados, utilizou-se o modelo SIMPACTS (*Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation*) que considera uma área de 25 km² ao redor da usina. Este modelo utiliza as características da usina termelétrica (altura da chaminé, velocidade e temperatura do vapor de saída etc.), a emissão de poluentes da usina (SO₂, NO_x e MP₁₀) e a densidade populacional ao redor da usina, para calcular os custos ocasionados por doenças respiratórias como asma (uso de broncodilatador), sintomas respiratórios crônicos menores, mortalidade infantil e mortalidade aguda.

PALAVRAS-CHAVE: SIMPACTS, Gás Natural, Poluentes, doenças respiratórias.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias tornou-se um tema cotidiano em nossa sociedade, para proporcionar melhoria e comodidade para a população. Essa evolução nos produtos e serviços oferecidos está relacionada com o crescimento econômico de uma região ou país, porém, também ocasiona uma elevação no consumo de energia elétrica mundial. Em termos de matriz elétrica mundial, destaca-se o uso de fontes não renováveis como o carvão mineral (38%) e o gás natural (23%), que se difere bastante da matriz elétrica brasileira, cuja fonte majoritária é renovável com o uso de hidrelétricas (64,9%), mas também possui uma parcela menor de fontes não renováveis carvão mineral (3,1%) e gás natural (8,3%) **(EPE, 2021)**.

No Brasil, 33,6% da energia elétrica produzida através de usinas termelétricas (UTES) utiliza o gás natural como o combustível para queima, o que representa cerca de 12,17 GW da capacidade total das UTES. Do total de 113 termelétricas operando a gás natural, 49% encontram-se na região sudeste do país (Silas de Oliveira Coelho, 2014). Quando comparado à queima de combustíveis fósseis, a queima do gás natural exibe uma menor emissão de óxidos enxofre (SOx), porém os óxidos de nitrogênio (NOx) e óxidos de carbono (COx) devem ser analisados e controlados, a fim de evitar doenças respiratórias na população residente aos redores da usina **(Ministério do Meio Ambiente, 2021)**.

Um dos maiores problemas da utilização de termelétricas a combustíveis fósseis é a emissão de poluentes e gases de efeito estufa (GEE) que afetam a sociedade a nível local e global. Com as crises hídricas a capacidade de geração das hidroelétricas diminui e se torna necessário o aumento de geração de energia elétrica a partir de usinas termelétricas a combustíveis fósseis. Dentre elas a maior contribuição é do gás natural. **(Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2021; ANP, 2021)** Por um lado, ficou demonstrado que os GEE contribuem para o aquecimento global, **(United State Environmental Protection Agency, 2022)** enquanto a emissão de poluentes pode ocasionar problemas à saúde por doenças respiratórias, cardiovasculares entre outras doenças. **(Chittaranjan National Cancer Institute (CNCI); The Energy Research Institute (TERI), 2007)**

Segundo a FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente) de Minas Gerais, a qualidade do ar e efeitos na saúde variam entre boa, regular, inadequada, má e péssima. A qualidade boa do ar refere-se a padrões que contêm efeitos desprezíveis na saúde humana, desta forma são aceitáveis de 0 a 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de MP_{10} , de 0 a 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de O_3 , de 0 a 4,5 ppm de CO, de 0 a 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de NO_2 e de 0 a 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de SO_2 (FEAM, 2021). A deliberação normativa da COPAM (Conselho Estadual de Política Ambiental) nº187 DE 19/09/2013 – Estadual de Minas Gerais, prevê condições e limites máximos de emissão (LME) de poluentes atmosféricos provenientes de fontes fixas, onde descreve-se no Anexo II as Condições e LME para turbinas geradoras de energia elétrica movidas a gás natural ou a combustíveis líquidos, em ciclo simples ou combinado. Para turbinas com potência acima de 100 MW operando a gás natural, as condições e LME, base seca, a 15% de O_2 , são de 50 $\text{mg}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^3$ para NOx, 65 $\text{mg}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^3$ para CO e não aplicável para SOx e MP **(Legisweb LTDA, 2021)**.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os impactos à saúde da população oriundos das emissões atmosféricas de uma termelétrica a gás natural. A Usina Termelétrica (UTE), objeto do estudo, que opera utilizando o gás natural

como fonte energética e possui uma capacidade de geração de 226 MW, localiza-se no município de Ibirité, região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. Por encontrar-se em uma região com uma grande presença da população, é de grande valia o estudo dos gases poluentes que são emitidos durante sua operação (**IBIRITERMO, 2020**). Assim, os impactos do uso da tecnologia na sociedade podem ser avaliados. Em razão da carência de dados, o estudo se inicia através de uma aproximação dos valores de emissões de poluentes, obtida através da equação disponível na *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors* da Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos (**EPA, 1997**), comparando os possíveis casos de emissão de poluentes ao redor da usina para três casos diferentes: i) emissões atmosféricas sem filtros nas chaminés; ii) emissões com filtro de 13% de eficiência; iii) emissões usando filtro de 90% de eficiência.

Na ausência de dados experimentais é necessário recorrer a simulações onde sejam consideradas às condições climáticas ao redor das usinas assim como as diferentes variáveis que podem influenciar as plumas de emissões. Modelos como o CALPUFF são utilizados para poder calcular a dispersão dos poluentes ao redor da usina (**Exponent, 2022**). O modelo SIMPACTS (*Simplified Approach for Estimating Environmental Impacts and External Costs of Electricity Generation*) utiliza o modelo CALPUFF para obter a dispersão de poluentes ao redor da usina e obter a quantificação dos danos à saúde da população vizinha as usinas termelétricas, ocasionados pelos gases poluentes dispersos na pluma de emissões. A simulação é realizada em função do ponto geográfico da usina para poder calcular os fatores meteorológicos como velocidade e direção dos ventos, dependendo das estações e épocas no ano. Além disso é necessário calcular a densidade populacional e obter algumas especificações técnicas da própria usina como altura e diâmetro da chaminé, velocidade e temperatura de saída dos gases emitidos (**Fouladi Fard R, 2016; Sanaz Tajziehchi, 2014**).

METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em uma pesquisa exploratória, com abordagem qualitativa pela análise e coleta dos dados utilizados, bem como quantitativa pela análise de aspectos técnicos da estrutura tecnológica da UTE na região metropolitana de Ibirité, Minas Gerais. A pesquisa se baseia no modelo SIMPACTS que permite estimar de forma quantitativa os impactos da geração de eletricidade através de uma abordagem simplificada. O SIMPACTS foi desenvolvido pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) para caracterizar os impactos produzidos por três diferentes tipos de empreendimentos, dentre eles as termoelétricas a combustível fóssil, a energia nuclear e as hidrelétricas. Este programa foi projetado para calcular os impactos produzidos à população vizinha pelos poluentes emitidos na geração de energia elétrica em termelétricas a combustível fóssil, assim como os impactos produzidos pela liberação de radioisótopos de uma usina nuclear em caso de acidentes e os impactos físicos e econômicos provenientes de uma hidrelétrica de grande porte com barragem até 10 MW de potência (IAEA, 2021).

Modelo

Para realizar a simulação o primeiro passo é calcular a densidade populacional ao redor da usina, dividindo em 41 regiões de forma horizontal e vertical a área de 5 km x 5 km, resultando em 1.681 quadrados de 121,95 m². Usando o Autocad é contabilizado o número lares em cada quadrado, considerando uma média de 4 habitantes por residência. Dessa forma conseguimos a densidade populacional em cada quadrado da matriz em função de um valor.

Logo, é necessário preencher algumas das características da usina (Governo do Estado de Minas Gerais, 2018), algumas destas foram aproximadas devidas à falta de informações como o diâmetro da chaminé que foi calculado usando o Google Earth.

- Altitude da área onde está localizada a usina (877 m)
- Altura da Chaminé (60 m)
- Diâmetro da chaminé (5,75 m)
- Temperatura de saída dos fluídos (375,55 K)
- Velocidade de saída dos fluídos (16,5 m.s⁻¹)
- Ciclo de emissão: Constante ou mensal
- Unidade da taxa de emissão
- Concentrações das emissões de SO₂, NO_x MP₁₀ O₃ e NH₃

O seguinte passo é inserir o tipo de doenças que serão avaliadas segundo a Tabela 1. Para este caso estudo as variáveis de: relação taxa de aumento de risco, a taxa de incidência, a porcentagem da população afetada e custo do tratamento por caso foi analisada como padrão segundo medições médias internacionais para cada caso. Estas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis avaliadas para cada tipo de doença (IAEA, 2021)

Doença		taxa de aumento de risco (% por µg/m ³)	taxa de incidência (casos por ano)	Porcentagem da população afetada (%)	custo do tratamento (US\$/caso)
Mortalidade crônica - População inteira	SO ₂	-	-	-	1104
	NO _x	-	-	-	16521,07
	MP ₁₀	-	-	-	55266,38
Mortalidade infantil - Menores de 12 meses	SO ₂	0,40	0,0045	1,00	330418,19
	NO _x	0,20	0,0045	1,00	330418,19
	MP ₁₀	0,40	0,0045	1,00	330418,19
Mortalidade aguda - População inteira	SO ₂	0,030	0,0096	100,00	24781,25
	NO _x	0,015	0,0096	100,00	24781,25
	MP ₁₀	0,030	0,0096	100,00	24781,25
Uso de broncodilatador - asma adultos, maiores de 20 anos	SO ₂	0,050	1,8E+2	3,50	0,36
	NO _x	0,022	1,1E+2	23,30	12,61
	MP ₁₀	0,050	1,8E+2	3,50	0,36
Uso de broncodilatador	SO ₂	0,045	1,4E+2	2,20	0,36
	NO _x	0,022	37	2,20	0,36

- asma crianças, 5-14 anos	MP ₁₀	0,045	37	2,20	0,36
Dificuldade respiratória - adultos com dificuldade respiratória crônica	SO ₂	0,12	1,1E+2	23,30	12,61
	NO _x	0,059	1,1E+2	23,30	12,61
	MP ₁₀	0,12	1,1E+2	23,30	12,61
Dificuldade respiratória - Crianças de 5-14 anos	SO ₂	0,34	55	11,00	12,61
	NO _x	0,17	55	11,00	12,61
	MP ₁₀	0,34	55	11,00	12,61
Restrição de atividades diárias - Adultos que trabalham, 15-64 anos	SO ₂	0,29	19	42,90	42,86
	NO _x	0,14	19	42,90	42,86
	MP ₁₀	0,29	19	42,90	42,86
Restrição de atividades diárias - Adultos que não trabalham, 15-64 anos	SO ₂	0,29	19	4,86	15,13
	NO _x	0,14	19	4,86	15,13
	MP ₁₀	0,29	19	4,86	15,13
Internação cardíaca - População inteira	SO ₂	0,060	0,0070	100,00	665,57
	NO _x	0,030	0,0070	100,00	665,57
	MP ₁₀	0,060	0,0070	100,00	665,57
Internação por problemas respiratórios - População inteira	SO ₂	0,11	0,0062	100,00	665,57
	NO _x	0,057	0,0062	100,00	3997,73
	MP ₁₀	0,11	0,0062	100,00	665,57
Bronquite crônica - Adultos, maiores de 27 anos	SO ₂	0,70	0,0038	68,40	66083,57
	NO _x	0,35	0,0038	68,40	66083,57
	MP ₁₀	0,70	0,0038	68,40	66083,57

O seguinte passo é calcular a emissão de poluentes mensais, isto foi realizado usando como referência os valores de geração de energia elétrica da termelétrica a gás natural do site da Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para os anos de 2013 até 2019 com apresentado na Tabela 2. (ONS, 2022).

Tabela 2. Dados de geração de energia elétrica anuais

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
GWh	322,15	262,58	311,25	146,69	229,08	112,15	248,71

Uma vez sabendo a geração de energia para cada ano, o seguinte passo é calcular a emissão de poluentes como é mostrado na seguinte seção.

Emissão de Poluentes de uma Termoelétrica

Os impactos à saúde do tipo k cobrem uma diversidade de faixas etárias e tipos de doença, sendo divididos por substância emitida causadora. Para cada uma das três substâncias (MP₁₀, SO₂ e NO_x). As faixas etárias consideradas são casos para adultos (15-64 anos) e crianças (0-14 anos) separadamente. Já os parâmetros de mortalidade crônica e aguda e de internação cardíaca e respiratória consideram a população absoluta. O estudo inicial se deu na obtenção dos dados de emissões de poluentes oriundos da Usina Termelétrica de Ibirité. Devido à falta de dados, os valores de emissões de poluentes foram estimados segundo o relatório de inventário de emissões de gases de efeito estufa, presente na metodologia retratada na 5ª Edição da “AP-42 – *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*” (EPA, 1997). Tal metodologia apresenta a seguinte equação para calcular a quantidade de poluentes emitidos:

$$E_{ij} = \frac{EG_i * f * EF_j}{e_i} * \left(1 - \frac{ER_j}{100}\right) \quad (6)$$

Onde:

E_{ij} = Emissões de determinado poluente (j) para determinada usina (i) [t];

EG_i = Energia gerada em determinada usina (i) [MWh];

e_i = Eficiência térmica de cada usina em função do tipo de geração (i) [%];

f = Constante de conversão de MWh para TJ [TJ/MWh];

EF_j = Fator de Emissão de Determinado Poluente (j) [t/TJ];

ER_j = Eficiência de Redução do Sistema de Controle de Determinado Poluente (j) [%].

Para a ER_j considerou-se três cenários, o primeiro com eficiência zero para todos os poluentes (SO_x, NO_x e MP₁₀), o segundo com eficiência de 13% na redução de NO_x e o terceiro com eficiência de 90% na redução de NO_x (EPA, 1998). A Energia gerada na usina (EG_i) foi obtida através do site do “Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)” e os demais fatores foram retirados da AP-42 (EPA, 1997; Nicholas P. Cheremisinoff, 2009).

SIMPACTS – dispersão de poluentes

No caso do tipo fóssil, o modelo começa analisando a região geográfica da usina termoelétrica, tendo em consideração a temperatura, velocidade dos ventos, precipitação e uso da terra. O SIMPACTS utiliza o modelo “CALPUFF” para representar a pluma de emissões como um volume de material poluente. Os componentes utilizados pelo modelo para o cálculo são: a função de amostragem “*puff*”, o cálculo dos coeficientes de dispersão, interação “*puff-terrain*”, deposição seca, transformação química e remoção úmida. O método CALPUFF é adequado para cálculos da concentração de poluição do ar ao nível do solo em escala local ou regional. Os impactos são calculados a partir da geração elétrica e suas emissões com a queima do combustível fóssil segundo as condições meteorológicas, assim como o transporte e dispersão de poluente em relação à população residente aos

arredores da usina (IAEA, 2021). Os cálculos executados pelo programa são dados pelas seguintes equações:

$$erf_{xy} = \begin{cases} 0.007 \cdot (C_{xy}^{BG})^2 & 0.259 \cdot C_{xy}^{BG}, & C_{xy}^{BG} \leq 39\mu\text{g}/\text{m}^3 \\ 0.241 \cdot C_{xy}^{BG}, & C_{xy}^{BG} > 39\mu\text{g}/\text{m}^3 \end{cases} \quad (1)$$

Em que C_{xy}^{BG} é a concentração do poluente SO_2 na área de amostra A_{xy} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

$$I_r = \sum_{x=1}^{41} \sum_{y=1}^{41} R_{rxy} \cdot erf_{rxy} \cdot C_{xy} \quad (2)$$

R_{rxy} é a produção agrícola anual (toneladas por ano) do receptor tipo r na área de cobertura A_{xy} ; erf_{rxy} é a função de resposta do receptor tipo r (% de mudança por $\mu\text{g}/\text{m}^3$); C_{xy} é o aumento de concentração do poluente SO_2 na área de cobertura A_{xy} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$$I_{ik} = G^2 \cdot \sum_{x=1}^{41} \sum_{y=1}^{41} \rho_{xy} \cdot erf_{ik} \cdot C_{ixy} \quad (3)$$

G é o tamanho da malha para cada área de cobertura A_{xy} dentro do domínio (km); ρ_{xy} é a densidade populacional na área de cobertura A_{xy} (pessoas por km^2); erf_{ik} é a unidade por tipo de impacto à saúde do tipo k e de espécie i (casos por ano por pessoa por $\mu\text{g}/\text{m}^3$); C_{ixy} é o aumento na concentração no ar a nível do solo, dentro da área de cobertura A_{xy} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

$$ECY_{ik} = I_{ik} \cdot U_k \quad (4)$$

I_{ik} é o impacto à saúde do tipo k e espécie i (casos por ano); U_k é a unidade de custo por impacto k (dólares por caso)

$$ECY_r = \sum_{x=1}^{41} \sum_{y=1}^{41} I_{rxy} \cdot U_r \quad (5)$$

I_{rxy} é a diminuição do rendimento das plantações (toneladas por ano); U_r é a unidade de custo por tipo de receptor r (dólares por tonelada).

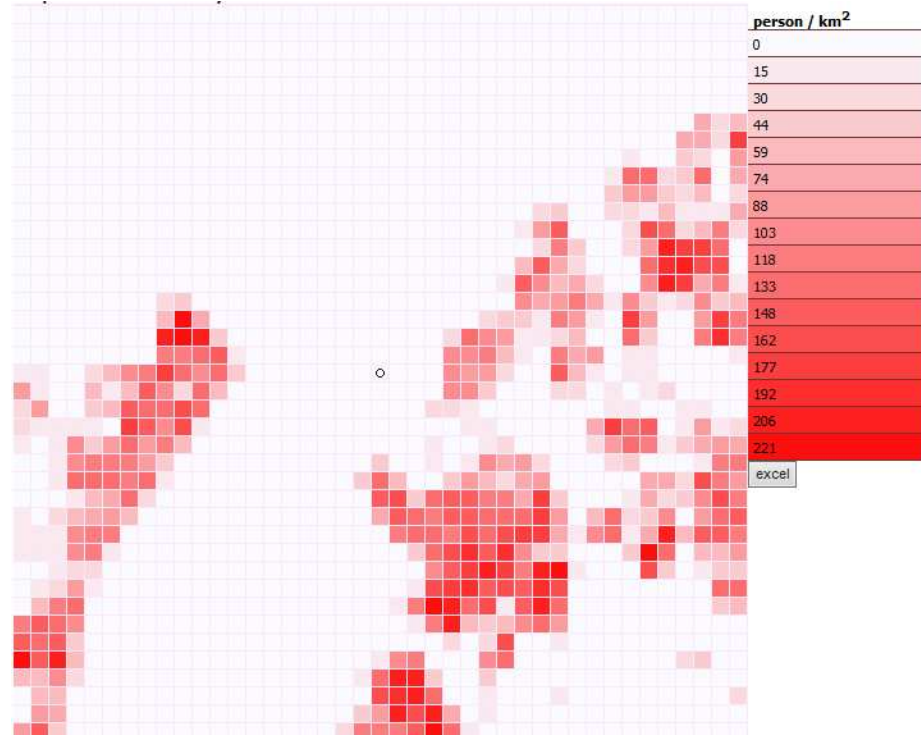
Os impactos à saúde do tipo k , nas Equações 3 e 4, abrangem faixas etárias e doenças variadas, referentes a cada substância causadora. Para as substâncias (MP_{10} , SO_2 e NO_x), está associado um impacto do tipo k . As faixas etárias contabilizadas são adultos e crianças separadamente, embora a mortalidade crônica e aguda se refira a toda a população.

RESULTADOS

Os resultados obtidos através do modelo SIMPACTS levam em consideração o poluente emitido e seus danos à saúde da população vizinha à usina de acordo

com a faixa etária. A distribuição da densidade de população ao redor da usina, para uma área de 5 km x 5 km, tem a distribuição conforme a Figura 1, considerando o círculo localizado no centro como a chaminé da termelétrica.

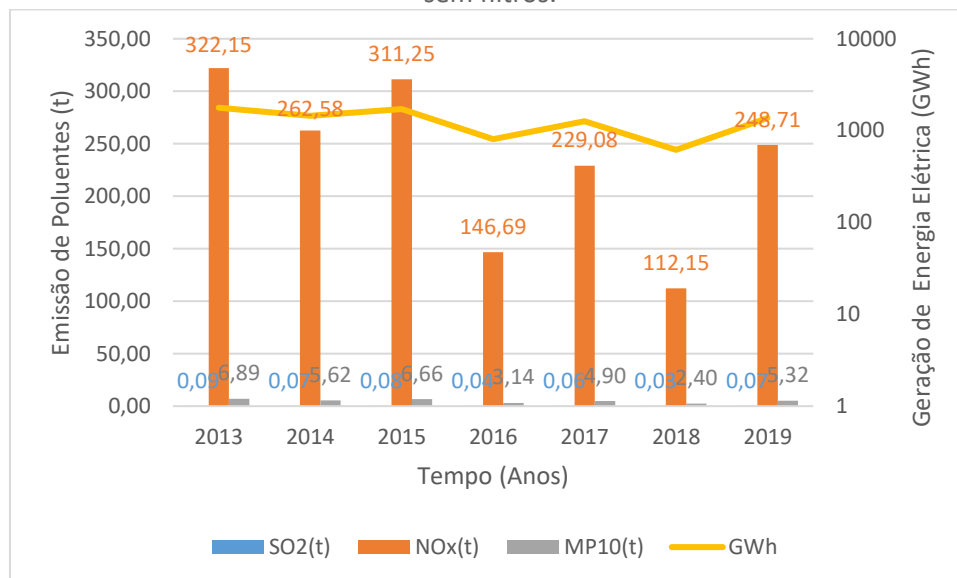
Figura 1: Distribuição da população ao redor da usina.



Emissões sem sistema de controle de NO_x – ERj = 0%

A Figura 2 mostra os dados de geração de energia elétrica e emissão de poluentes para os anos estudados, 2013 apresentou a maior produção de energia elétrica (1773 GWh), seguido do ano 2015 (1713 GWh) para a termelétrica em estudo, enquanto 2018 foi o ano de menor produção (617 GWh), de acordo com os dados da ONS. É importante ressaltar que a emissão de NO_x acompanha a geração de energia elétrica, ou seja, enquanto maior a geração de energia elétrica maior as emissões de NO_x. As emissões SO_x são muito baixas se comparadas com as emissões de NO_x, ao redor de 0,02 e 0,08 toneladas por ano. Por outro lado, as emissões de MP₁₀ oscilam entre os valores de 2,4 a 6,89 toneladas. Então, pode-se ver que o maior problema da usina a gás natural está relacionado com as quantidades totais de poluente de NO_x, por isso é necessário o estudo de filtros que reduzam as emissões de NO_x emitidas pelas usinas a gás natural, para poder reduzir os custos ocasionados pela poluição de NO_x.

Figura 2. Emissão de Poluentes e geração de energia elétrica da termoeletrica sem filtros.



Considerando a eficiência de redução de poluentes igual a zero, a Tabela 3 apresenta os custos em dólares associados às emissões de poluentes para cada ano (2013 – 2019) e por tipo de poluente: material particulado, sulfatos e nitratos. O ano de 2015 apresenta o maior custo total na saúde, enquanto o ano de 2016 embora não seja o menor ano de geração de energia elétrica, este apresenta o menor custo quando comparado aos outros anos. Desta forma, os resultados indicam que não há uma relação somente com o total de energia elétrica produzida por ano, e sim com a pluma de emissões de gases poluentes e como ela é dispersada em função da velocidade e direção do vento, que variam de acordo com os meses e estações do ano.

Tabela 3: Custos na saúde da população vizinha a Usina de Ibitaré ERj = 0%.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
MP₁₀							
Subtotal [US\$ / ano]	658,3	552,5	653,5	222,9	484,4	290,3	441,4
Sulfatos							
Subtotal [US\$ / ano]	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2
Nitratos							
Subtotal [US\$ / ano]	610,2	567,0	623,4	235,5	422,6	354,94	350,5
Custos totais na saúde [US\$ / ano]	1268,8	1119,8	1277,2	458,5	907,1	647,4	792,1

As Figuras 3 e 4 mostram a dispersão de cada poluente ao redor da usina, considerando para o ano 2015, que é o ano com maiores custos totais na saúde. As concentrações de MP₁₀ ao redor da usina encontram-se entre 0,00014 µg.m⁻³ e

0,00215 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, para o SO_2 as concentrações encontram-se entre 0,000018 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e 0,0000289 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e para o NO_x as concentrações encontram-se entre 0,007 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e 0,114 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Nota-se que a dispersão atinge principalmente a região ao sudoeste da usina, que é uma área onde há pessoas residentes. O fato da geração de energia elétrica naquele ano ter sido consideravelmente alta (1.712.835,35 MWh), aumenta a quantidade de poluentes produzidos que contribui também para aumentar a concentração de poluentes naquela região.

Figura 3: Concentração de MP_{10} (esquerda) e SO_2 (direita) ao redor da usina no ano de 2015.

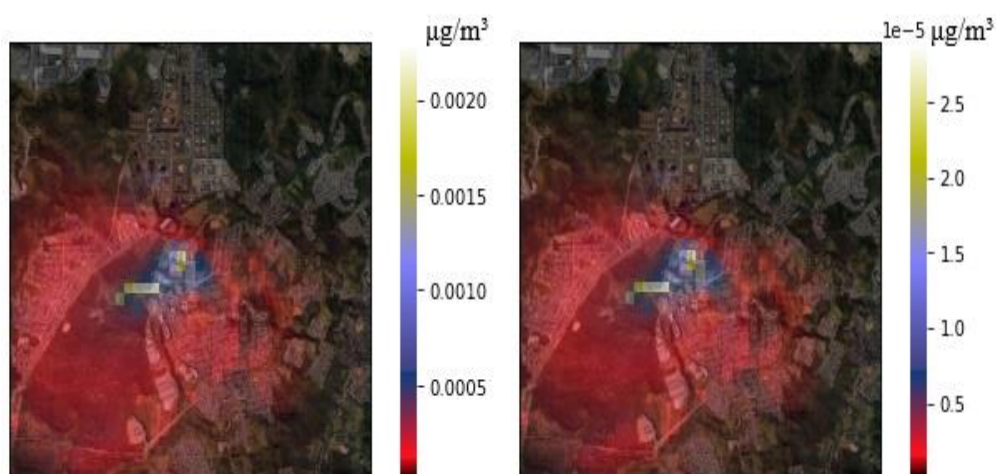
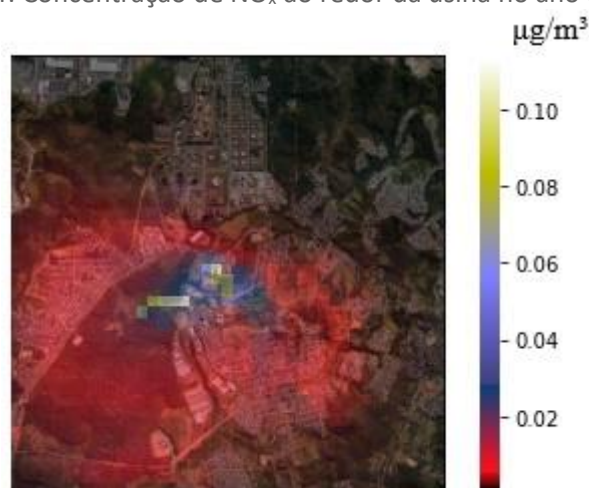


Figura 4: Concentração de NO_x ao redor da usina no ano de 2015.



As Figuras 5 e 6 mostram a dispersão de poluentes ao redor da termelétrica a gás natural para o ano 2016. O ano 2016 foi escolhido por apresentar o menor custo total à saúde devido à emissão de poluentes da termoeletrica. A geração de energia elétrica neste ano foi uma das mais baixas (807.245,10 MWh). A

concentração de emissão para o MP_{10} encontra-se entre $6,0 \times 10^{-5} \mu\text{g.m}^{-3}$ e $84,0 \times 10^{-5} \mu\text{g.m}^{-3}$, para o SO_2 entre $0,07 \times 10^{-5} \mu\text{g.m}^{-3}$ e $1,1 \times 10^{-5} \mu\text{g.m}^{-3}$, para o NO_x entre $0,005 \mu\text{g.m}^{-3}$ e $0,078 \mu\text{g.m}^{-3}$. Observa-se que a dispersão de poluentes ao redor da usina influencia no custo total das doenças associadas.

Figura 5: Concentração de MP_{10} (esquerda) e SO_2 (direita) ao redor da usina no ano de 2016.

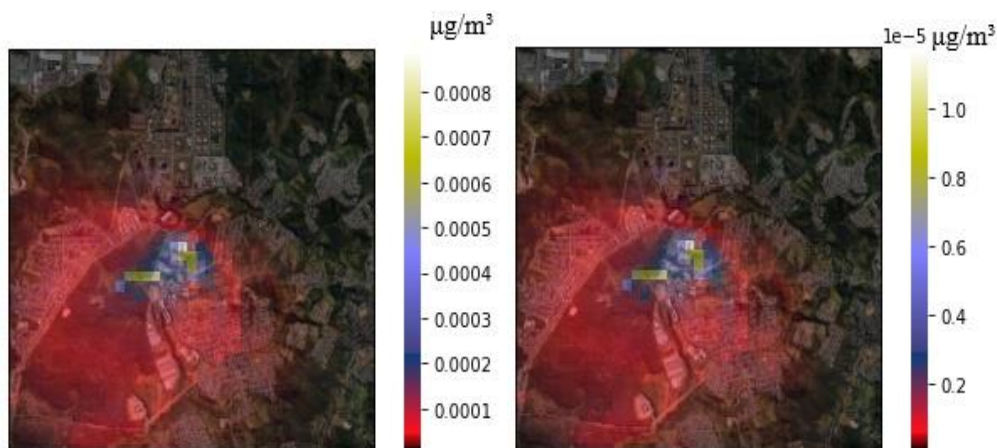
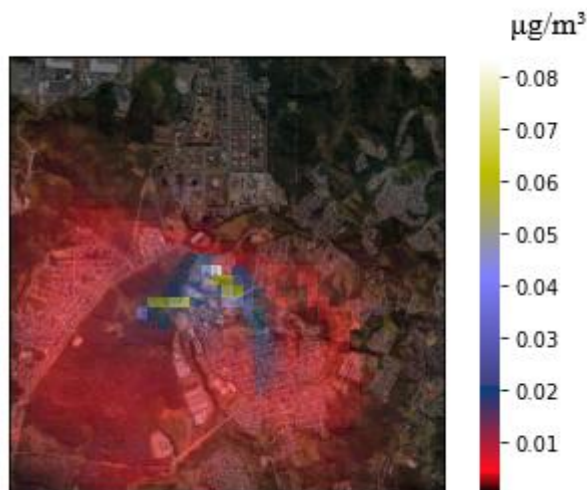


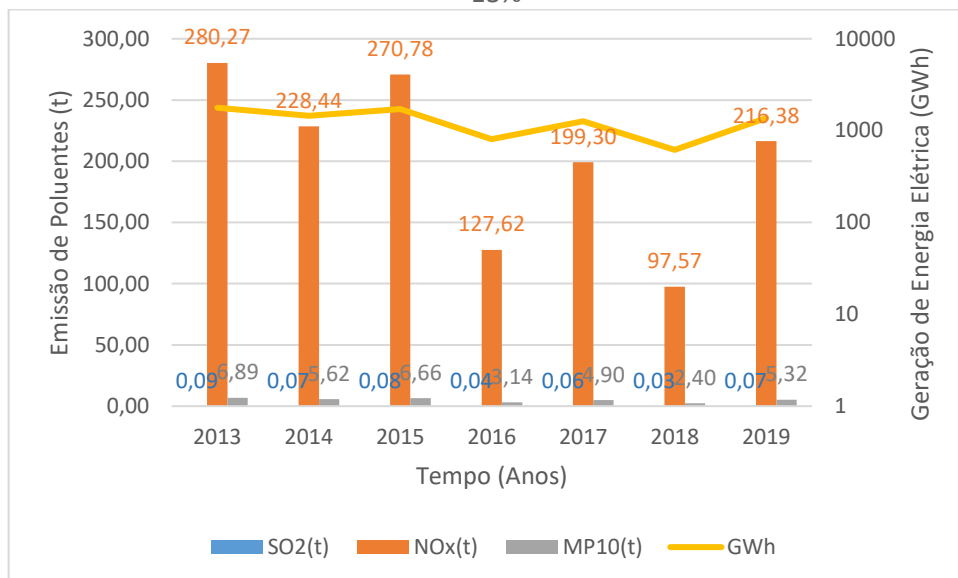
Figura 6: Concentração de NO_x ao redor da usina no ano de 2016.



Sistema de controle de NO_x , redução das emissões em ERj = 13%

A Figura 7 apresenta as emissões de poluentes considerando 13% de eficiência na redução do sistema de controle de determinado poluente. Este sistema poderia reduzir até 13% as emissões de NO_x e 0% de eficiência para os demais poluentes com o mesmo nível de geração de energia elétrica.

Figura 7. Emissão de poluentes com filtro usando um filtro redução de NOx ao 13%



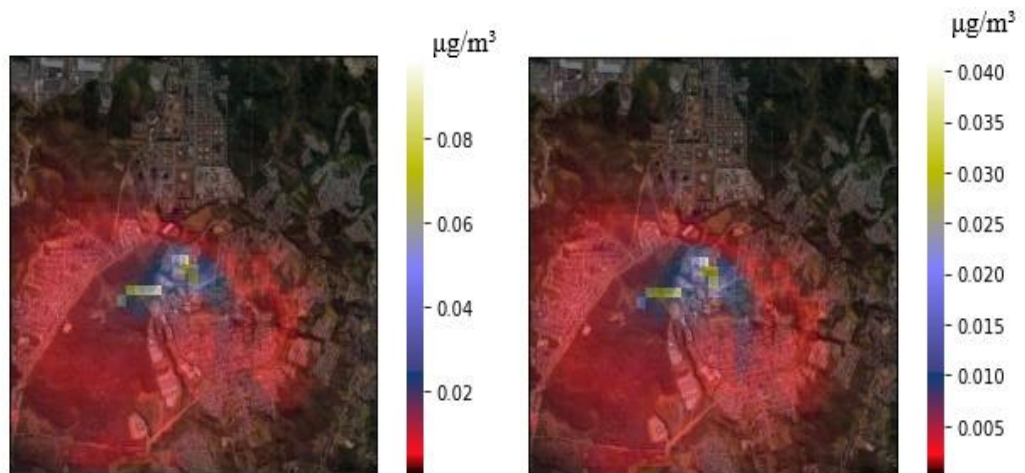
A Tabela 4 mostra os custos associados às doenças ocasionadas pela emissão de poluentes. Com o uso do sistema de controle para redução em 13% de NO_x, os custos por doenças associados às emissões na maioria dos casos também são reduzidos aproximadamente 13% para todos os anos com exceção do ano 2016. Neste ano o filtro reduziu em 40% os custos associados a doenças por emissões de NO_x. Mas no custo total a redução foi de 21% do custo sem filtro.

Tabela 4: Custos na saúde da população vizinha a Usina de Ibitiré ERj=13% para NO_x.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
MP₁₀							
Subtotal [US\$ / ano]	658,3	552,5	653,5	222,9	484,4	290,3	441,4
Sulfatos							
Subtotal [US\$ / ano]	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2
Nitratos							
Subtotal [US\$ / ano]	530,9	493,3	542,3	137,8	367,6	310,5	304,9
Custos totais na saúde [US\$ / ano]	1189,5	1046,1	1196,1	360,8	852,2	601	746,5

A Figura 8 apresenta a dispersão de poluentes de NO_x usando um filtro de 13%. A maior concentração de emissões encontra-se na direção sul-oeste, para os dois anos, no entanto para o ano de 2016 as concentrações são muito inferiores em relação ao ano de 2015. Neste ano houve um maior custo associado às doenças. A concentração das emissões de NO_x encontra-se entre 0,006 µg.m⁻³ e 0,099 µg.m⁻³. Enquanto, para o ano de 2016 que teve um menor custo associado às doenças, a emissão de NO_x variou de 0,003 µg.m⁻³ a 0,039 µg.m⁻³.

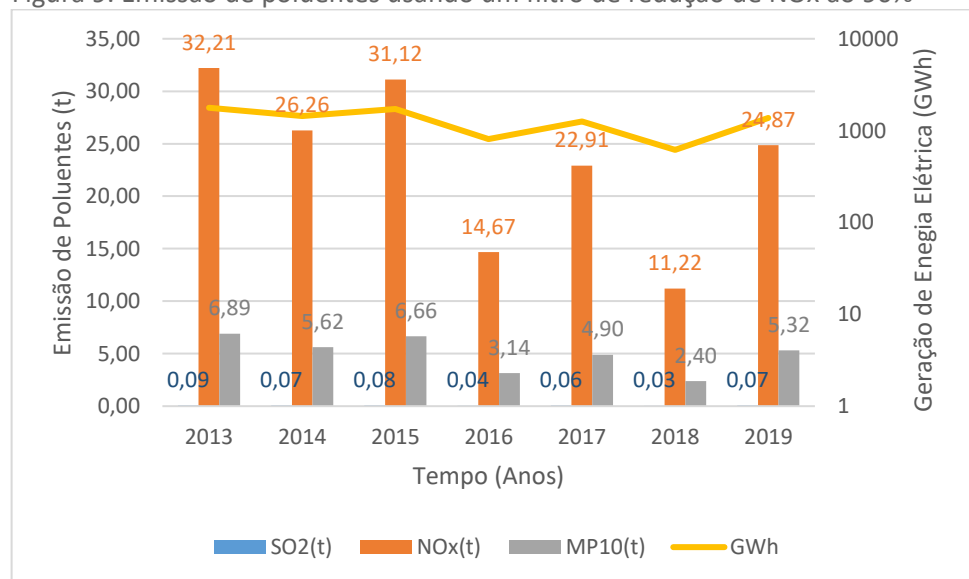
Figura 8: Concentração de óxidos de nitrogênio ao redor da usina no ano de 2015 (esquerda) e 2016 (direita), considerando um sistema com um filtro com eficiência de 13%.



Sistema de controle de NOx, redução das emissões em ERJ = 90%

A Figura 9 apresenta a geração de energia elétrica da termoelétrica e a emissão de poluentes correspondente em toneladas usando um sistema de controle que filtra 90% de NOx. Quando aplicado este sistema de controle de poluente de NOx, a redução do preço também foi de 90%, com exceção do ano 2016 no qual houve um ganho de 93% na redução de preço devido a utilização do sistema de controle.

Figura 9. Emissão de poluentes usando um filtro de redução de NOx ao 90%



Na Tabela 5, encontra-se os custos associados às doenças produzidas pela emissão de poluentes do ano 2013 até 2019, considerando a eficiência de redução

do sistema de controle de determinado poluente igual a 90% para o NO_x e 0% de eficiência para os demais poluentes.

Tabela 5: Custos na saúde da população vizinha a Usina de Ibirité ERj = 90% para NO_x.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
MP₁₀ Subtotal [US\$ / ano]	658,3	552,5	653,5	222,9	484,4	290,3	441,4
Sulfatos Subtotal [US\$ / ano]	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2
Nitratos Subtotal [US\$ / ano]	61	56,7	62,3	15,8	42,3	35,7	35,1
Custos totais na saúde [US\$ / ano]	719,6	609,5	716,2	238,8	526,9	326,2	476,7

Para um sistema onde há um filtro com eficiência de 90% para óxidos de nitrogênio, observa-se que 2015 deixa de ser o ano que apresenta o maior custo total na saúde, ficando atrás do ano 2013. Essa diferença ocorreu, pois, o material particulado tem o maior custo em 2013, superando os custos dos nitratos que são maiores em 2015. As Figuras 8 e 9 mostram as dispersões dos poluentes para o ano de 2013 com o sistema de controle de 90% para NO_x. As concentrações para cada poluente são: MP₁₀ encontra-se entre 0,00015 µg.m⁻³ e 0,00218 µg.m⁻³, SO₂ entre 0,18x10⁻⁵ µg.m⁻³ e 2,75x10⁻⁵ µg.m⁻³ e NO_x entre 0,0007 µg.m⁻³ e 0,0116 µg.m⁻³.

Figura 8: Concentração de MP₁₀ (esquerda) e SO₂ (direita) ao redor da usina no ano de 2013, considerando um sistema com um filtro com eficiência de 90%.

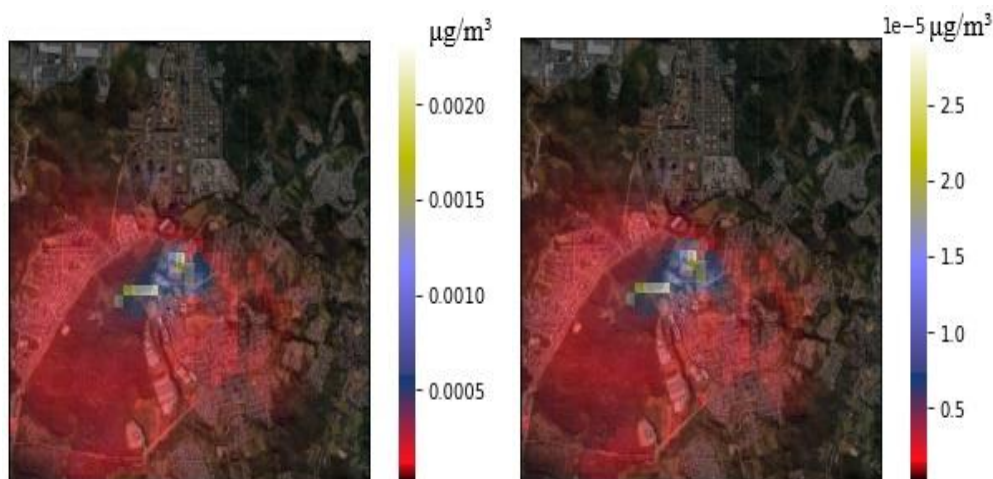
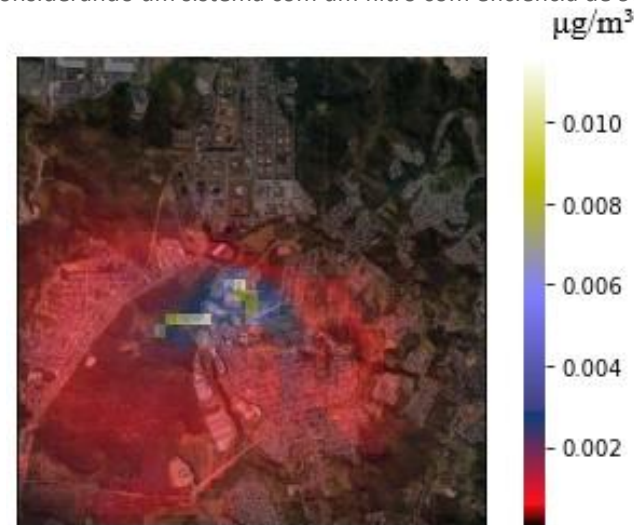


Figura 9: Concentração de óxidos de nitrogênio ao redor da usina no ano de 2013, considerando um sistema com um filtro com eficiência de 90%.



DISCUSSÃO

A geração de energia elétrica no Brasil é constituída principalmente de hidrelétrica, precisando assim de chuvas periódicas para sua manutenção. Em Minas Gerais, enfrentou-se a escassez de água no ano de 2015, com o nível do rio Grande (que abastece a Hidrelétrica de Furnas) em estado de alerta representando risco de escassez de água. No ano de 2016, ainda se encontrava em crise, porém o volume de água do rio apresentou uma elevação, passando do estado de alerta para o estado de atenção (SIMGE, 2021). Tal fato também implica no funcionamento das UTEs, como observa-se que a usina termelétrica de Ibirité operou em maior capacidade em 2015 (1.712.835,35 MWh) se comparado ao ano de 2016 (807.245,10 MWh).

Os dados de qualidade do ar, obtidos pela FEAM através da estação Cascata em Ibirité, demonstram que para o ano de 2018 a média apresentada de CO foi de 0,43 ppm, de NO₂ foi de 7,6 μg.m⁻³, de O₃ foi de 16,42 μg.m⁻³, de MP₁₀ foi de 23,49 μg.m⁻³ e de SO₂ foi de 2,787 μg.m⁻³ (FEAM, 2021). Esses valores referem-se aos poluentes medidos na atmosfera, tendo contribuição não somente da UTE, mas de todas as indústrias, fontes fixas e móveis presentes na região. No pior cenário, sem a utilização de filtros, a UTE de Ibirité em seu ano de maior impacto nos custos à saúde (2015), liberou a vizinhança emissões de MP₁₀ entre 0,00014 μg.m⁻³ e 0,00215 μg.m⁻³, de SO₂ entre 0,000018 μg.m⁻³ e 0,0000289 μg.m⁻³ e de NO_x entre 0,007 μg.m⁻³ e 0,114 μg.m⁻³. Observa-se que, comparando os valores emitidos pela usina e os valores de medições da FEAM na atmosfera, a UTE estudada contribui minimamente para a poluição encontrada na região.

Percebe-se que as medições, considerando todas as fontes poluidoras, se encontram dentro das normas de Qualidade Boa do Ar, deliberadas pela FEAM, e possuem riscos desprezíveis a saúde da população vizinha. Segundo o COPAM, para fontes fixas são aceitos como limites máximos de emissão 50.000 μg.m⁻³ de NO_x. No ano de maior emissão desse poluente (2015), foram emitidos apenas 0,114 μg.m⁻³ de NO_x e, portanto, todos os anos estudados apresentam emissões dentro dos limites estabelecido pela legislação do estado de Minas Gerais para

turbinas geradoras de energia elétrica movidas a gás natural ou a combustíveis líquidos, em ciclo simples ou combinado. No entanto, é sempre importante estimular a utilização de sistemas de controle de poluentes para reduzir os impactos à sociedade e ao meio ambiente.

Mesmo estando dentro dos limites regulatórios, vale ressaltar que o uso de qualquer tecnologia gera impactos no ambiente e na sociedade ao qual ela está inserida. Como observado, mesmo dentro dos limites estabelecidos pela legislação, as emissões de poluentes pela UTE impactam a saúde da população no entorno da usina. Tal impacto na sociedade pode ainda ser traduzido em custos sociais para remediar os danos causados pelas emissões de poluentes. Portanto, quanto menores as emissões, ou quanto melhor a eficiência dos sistemas de controle de poluentes, menores serão os impactos e custos sociais decorrentes destas.

Apesar de suas emissões, o gás natural apresenta vantagens frente a outros combustíveis fósseis, uma vez que sua queima produz uma redução de 20% a 23% na emissão de CO₂, quando comparada a queima de óleo combustível e uma redução de 40% a 50% se comparado à queima de carvão mineral (Fernando Antonio Alves Muniz, 2017). Na matriz elétrica brasileira, carvão, petróleo e seus derivados representam cerca de 5,3% do total das fontes utilizadas (EPE, 2021). Esse montante poderia ser substituído pelo gás natural, para redução de emissões de gases poluentes, ou por fontes renováveis.

Vale ressaltar que há uma incerteza associada aos dados de entrada considerados, segundo os valores apresentados no relatório AP-42 para realizar os cálculos. Assim, alguns pressupostos em relação às variáveis econômicas e técnicas podem afetar a avaliação monetária dos custos, entre elas a desvalorização da moeda e crise econômica do Brasil nos últimos anos. Estas incertezas ocorrem porque o modelo SIMPACTS faz uma estimativa segundo os preços internacionais para tratamento das doenças respiratórias consideradas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se que para os dois primeiros cenários analisados, os anos de 2015 e 2016 apresentaram, respectivamente, o maior e o menor valor de custos para doenças respiratórias. Assim, para o primeiro cenário analisado, sem a utilização de filtros, gerou-se custos na saúde de US\$1277,20 para o ano de 2015 e de US\$458,5 para o ano de 2016. Com a utilização de um filtro com 13% de eficiência na retenção de NO_x, de acordo com o segundo cenário, os custos à saúde por doenças respiratórias chegaram a US\$1196,1 para o ano de 2015 e de US\$360,8 para o ano de 2016. No terceiro cenário, com a utilização do filtro com 90% de eficiência para NO_x, o ano de 2013 foi o de maior custo por apresentar um montante de MP10 mais elevado do que o ano de 2015. Por isso, gerou-se um custo em 2013 de US\$719,6 e um custo em 2016, que foi o ano de menor emissão, de US\$238,8.

Considerando os valores do ano de 2015, com a utilização de um filtro com eficiência de 90% para retenção de NO_x, diminuiu-se cerca de 43,92% dos custos totais na saúde da população. Constata-se que a eficiência de redução das emissões de poluentes é um fator de grande importância, porque diminui

expressivamente as quantidades de gases que são liberados ao meio ambiente e, conseqüentemente, diminui os danos à saúde humana que são ocasionados por estes poluentes. Nota-se que o material particulado e os nitratos são os que mais provocam custos na saúde em uma termelétrica a gás natural, desta maneira um sistema mais eficaz deve contar com um filtro que diminua as emissões dessas substâncias para a atmosfera.

As emissões geradas pela UTE de Ibirité contribuem minimamente para essa poluição atmosférica da região. Os maiores dados de emissões de MP_{10} e SO_2 encontrados representam, respectivamente, cerca de 0,009% e 0,001% do valor total das medições realizadas pela FEAM. Além disso, as emissões de NO_x encontram-se dentro dos limites de emissões estabelecidos pelo COPAM para turbinas geradoras de energia movidas a gás natural. Mesmo no ano de maior emissão de poluentes NO_x , a usina emitiu menos de 1% do valor permitido por lei.

Com as imagens de dispersão obtidas através do modelo SIMPACTS, observa-se em relação à posição e velocidade do vento, as regiões ao sul e sudoeste da termelétrica de Ibirité são as mais afetadas com a dispersão dos gases poluentes. Assim, a população residente nos bairros Petrolina, Jardim das Rosas e Petrovale receberam maior quantidade de emissões. Como os anos de 2013 e 2015 apresentaram maiores quantidades de geração de energia, conseqüentemente também se observaram maiores emissões de gases poluentes. De forma semelhante, os anos de 2016 e 2018 geraram menos energia e emitiram menos gases poluentes se comparado aos demais anos. Porém os valores também se alteram de acordo com a dispersão da pluma de emissão para cada ano, determinada através de fatores meteorológicos.

A utilização de filtros, conforme mostrado no presente trabalho, diminui substancialmente a emissão de gases poluentes e conseqüentemente, há uma queda nos impactos sofridos e nos custos à saúde por doenças respiratórias. Deve-se, portanto, investir em filtros eficientes, que reduzam principalmente as emissões de NO_x e MP, que são os poluentes emitidos em maior quantidade pelas usinas que operam a gás natural.

Um trabalho futuro, será comparar o preço da implementação de um sistema de controle de poluente para a UTE, em relação aos preços de doenças ocasionada pela emissão de poluentes nas vizinhanças da UTE.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências brasileiras de financiamento da pesquisa, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa), CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior), CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), FAPEMIG (Fundação de Amparo à pesquisa de Minas Gerais) e PRPq (Pró-reitora de Pesquisa) Universidade Federal de Minas Gerais pelo apoio.

Social cost study of health impacts arising from natural gas thermal plant emissions in the Ibirite region

ABSTRACT

The Brazilian electricity matrix, despite being predominantly hydroelectric (64.9%), around 13% of the matrix is composed of fossil fuel thermoelectric plants, with the largest part being natural gas with 8.3%. According to several studies, the emission of pollutants is one of the main responsible for climate change in addition to being responsible for several respiratory problems of inhabitants around the thermoelectric plant. In this scenario, there is a thermoelectric plant located in the municipality of Ibirité/MG, which uses natural gas as an energy source and has a generation capacity of 226 MW. The present work carries out an approach of the health impacts of respiratory and cardiovascular diseases caused by pollutant emissions around a natural gas thermoelectric plant in the metropolitan region of Ibirité, quantifying the costs of medical treatment necessary for these diseases. For this it is necessary to consider some particular characteristics of the region such as geographic and meteorological data. As well as the operation data of the thermoelectric plant for the generation of electric energy in order to estimate the emissions produced. To obtain the results of the generated impacts, the SIMPACTS model (Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Eeneration) was used, which considers an area of 5 km x5 km around the plant. This model uses the characteristics of the thermoelectric plant (height of the chimney, speed and temperature of the exit steam, etc.), the emission of pollutants from the plant (SO₂, NO_x and PM10) and the population density around the plant, to calculate the costs caused respiratory diseases such as asthma (bronchodilator use), minor chronic respiratory symptoms, infant mortality and acute mortality.

KEYWORDS: SIMPACTS, Natural Gas, Pollutants, Respiratory diseases.

REFERENCIAS

ANP. (11 de Agosto de 2021). A história do gás natural no Brasil. Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: <http://www.anp.gov.br/institucional/a-historia-do-gas-natural-no-brasil>

ANP. (11 de Agosto de 2021). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Fonte: Ministério de Minas e Energia: <http://www.anp.gov.br/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/processamento-gas-natural>

Chittaranjan National Cancer Institute (CNCI); The Energy Research Institute (TERI). (2007). Social Cost of Air Pollution from power stations in west bengal. Kolkata: West Bengal Electricity Regulatory.

Eletrobras. (11 de Agosto de 2021). FURNAS. Fonte: Furnas - Empresa Eletrobras: <https://www.furnas.com.br/subsecao/120/usina-de-furnas---1216-mw?culture=pt>

EPA. (1997). AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors. U.S. Environmental Protection Agency,.

EPA. (1998). Emissions Factor Documentation. U.S. Environmental Protection Agency.

EPE. (08 de Agosto de 2021). Empresa de Pesquisa Energética. Fonte: Epe: <https://www.epe.gov.br/pt>

Exponent. (20 de Junho de 2022). Engineering and Scientific Consulting. Fonte: CALPUFF modeling system: www.src.com

FEAM. (11 de Agosto de 2021). portal meioambiente.mg. Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente: <http://feam.br/component/content/article/15/1757-ibirite>

FEAM. (11 de Agosto de 2021). Qualidade do Ar. Fonte: portal meioambiente.mg: <http://feam.br/qualidade-do-ar/qualidade-do-ar>

Fernando Antonio Alves Muniz. (2017). O Gás Natural na matriz energética do Estado de Minas Gerais: suas vantagens competitivas para o setor industrial mineiro. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro.

Fouladi Fard R, N. K. (2016). The assessment of health impacts and external costs of natural gas-fired power plant of Qom. Environ Sci Pollut Res Int.

Governo do Estado de Minas Gerais. (2018). Parecer Único N°057/2018 (SIAM: 0349096/2018). Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável.

IAEA. (11 de Agosto de 2021). Energy modelling tools. Fonte: International Atomic Energy Agency: <https://www.iaea.org/topics/energy-planning/energy-modelling-tools>

IAEA. (11 de Agosto de 2021). IAEA Tool Helps Energy Planners Evaluate Environmental Impacts of Various Sources of Electricity . Fonte: International Atomic Energy Agency: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-tool-helps-energy-planners-evaluate-environmental-impacts-of-various-sources-of-electricity>

IBIRITERMO. (21 de Novembro de 2020). Emissão de Efluentes. Fonte: IBIRITERMO: <http://www.ibiritermo.com.br/home>

Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. (11 de Agosto de 2021). Observatório do Setor. Fonte: Evolução da Participação dos estados na produção de gás natural: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/participacao-dos-estados-na-producao-de-gas-natural/>

Legisweb LTDA. (11 de Agosto de 2021). Deliberação Normativa. Fonte: LEGISWEB: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=258656>

Ministério do Meio Ambiente. (11 de Agosto de 2021). Meio Ambiente. Fonte: Qualidade do Ar: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar.html>

Nicholas P. Cheremisinoff, P. R. (2009). Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production: Best Practices in the Petroleum Industry. Burlington: Elseiver.

ONS. (21 de Junho de 2022). Historico de Operação. Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico: <http://www.ons.org.br/>

Sanaz Tajziehchi, S. M. (2014). DEVELOPMENT OF NEW MODEL FOR COMPUTATION OF EXTERNAL COSTS OF HYDROPOWER DAMS. OIDA International journal of Sustainable Development, 07, 109-120. Fonte: <https://ssrn.com/abstract=2492646>

Silas de Oliveira Coelho. (2014). Avaliação das Emissões Atmosféricas das Principais Termelétricas Brasileiras a Gás Natural. UFJF. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora.

SIMGE. (11 de Agosto de 2021). Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais. Fonte: Escassez Hídrica- Minas Gerais: http://www.simge.mg.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=4618&Itemid=268

United State Environmental Protection Agency. (20 de Junho de 2022). Climate Change Indicators. Fonte: Climate Change Indicators: Greenhouse Gases : <https://www.epa.gov/climate-indicators/greenhouse-gases>

Recebido: 18/08/2021

Aprovado: 05/09/2022

DOI: 10.3895/rts.v18n54.14641

Como citar: CAPISTRANO, B.F. et al. Estudo do custo social dos impactos à saúde oriundos das emissões da termelétrica a gás natural na região de Ibirité. *Rev. Technol. Soc.*, Curitiba, v. 18, n. 54, p. 1-20, out./dez., 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfr.edu.br/rts/article/view/14641>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

