

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

GABRIEL QUIRINO FECHINE

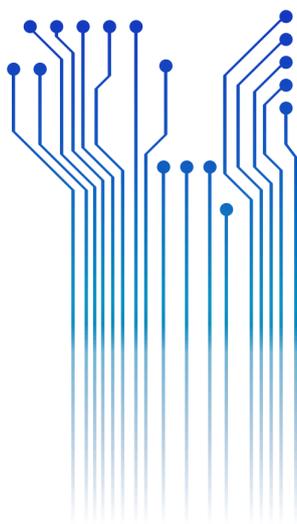


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ANÁLISE DE MÉTRICAS DE DESEMPENHO DE GERADORES EM UMA USINA
TERMOELÉTRICA



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

GABRIEL QUIRINO FECHINE

ANÁLISE DE MÉTRICAS DE DESEMPENHO DE GERADORES EM UMA USINA TERMOELÉTRICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2018

GABRIEL QUIRINO FECHINE

ANÁLISE DE MÉTRICAS DE DESEMPENHO DE GERADORES EM UMA USINA TERMOELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em 12/03/2018

Professor Antonio Barbosa de Oliveira Neto, M.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, Geovane e Vitória, pelo apoio, amor e carinho durante toda a minha vida. Sem o suporte deles eu não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Vitória Quirino, por tudo que fez e faz por mim, com muito amor e carinho. A base e educação que me proporcionou foi o que me fez alcançar esta etapa.

Ao meu pai, Geovane Fechine, que sempre foi um exemplo pra mim e esteve presente em todas as etapas da minha vida, me auxiliando sempre que precisei.

À minha tia, madrinha e segunda mãe, Joseana Fechine, por todo o suporte que me deu durante toda minha vida, além de ter me influenciado a buscar essa profissão e me ajudado durante todo o curso.

À minha irmã, Mariana, pelo companheirismo e parceria ao longo da vida; ao meu irmão Guilherme, aos meus avós Daísa e José, meus tios e toda a minha família que me ajudou a chegar até aqui.

À minha namorada e companheira, Jordana, pelo convívio diário, amor e carinho que foram essenciais para a conclusão dessa etapa das nossas vidas, juntos.

Aos amigos que Elétrica me deu a oportunidade de conhecer: Marcus, Yuri, Igor, Klynger, Isaac, Vinícius, Rafael, Arthur e tantos outros. A luta diária nesse curso foi mais fácil graças a vocês.

Aos meus amigos e irmãos que a vida me deu: Lucas, Túlio, Ícaro, João, Sérgio, Hamilton, Sávio, Yago obrigado por tudo.

À usina termoelétrica pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e a todos os funcionários da empresa que me auxiliaram no desenvolvimento.

Ao meu professor e orientador Célio Anésio, por todos os ensinamentos durante as disciplinas em que fui seu aluno e pelas orientações ao longo desses últimos meses.

Aos professores e funcionários do DEE que me auxiliaram durante essa jornada, em especial a Adail e Tchai, que foram fundamentais nesse processo.

RESUMO

Com as mudanças na matriz energética brasileira que vêm ocorrendo nos últimos anos devido às crises hídricas, estudos realizados em usinas termoelétricas se tornam cada vez mais pertinentes. No trabalho aqui descrito, a partir de uma análise documental dos registros de operação e de relatórios ambientais de uma usina termoelétrica, foram realizados estudos probabilísticos de métricas de desempenho da usina em questão. Essas análises foram divididas em: análises de correlação e análises de consumo específico e rendimento, a partir das quais são estudadas diferentes métricas, com diferentes abordagens. A primeira análise fornece indícios de que a correlação entre as métricas de desempenho estudadas (operacionais e ambientais) não seguem um padrão global, mas sim, dependem do motor sob análise. O resultado da análise seguinte foi de que grandezas como o consumo específico e o rendimento do grupo gerador se mantiveram praticamente constantes durante todo o período analisado. Porém, não foi possível obter resultados conclusivos, dado que a base de dados de métricas ambientais (emissões atmosféricas) utilizada foi restrita. Entretanto, a análise é promissora, dado que a ampliação da base de dados poderá proporcionar à empresa uma análise mais aprofundada da relação entre as métricas de desempenho na geração de uma usina termoelétrica.

Palavras-chave: Correlação; Usina termoelétrica; Emissões atmosféricas; Métricas de desempenho operacional e ambiental.

ABSTRACT

With the changes in the Brazilian energy matrix that have been occurring in the past few years due to the water crisis, researches in the thermoelectrical field become more and more relevant. In the research described here, from a documentary analysis of the operational registers and environmental reports of a thermoelectric power plant, were developed probabilistic researches of performance metrics of the plant in question. These analysis were divided in: correlation analysis and specific fuel oil consumption and efficiency analysis, where were studied different metrics, with different approaches. The first analysis provides indications that correlation coefficients between the studied performance metrics do not follow a rule, as they vary according to the analyzed engine. The result of the following analysis was that quantities like specific consumption and efficiency have remained nearly constant during the whole analysis period. However, it was not possible to obtain conclusive results, since the environmental performance metrics (atmospheric emissions) database was too restrict. However, the analysis is promising, since that a database ampliation may provide the company a deeper analysis between the performance metrics in the power generation of a thermoelectric plant.

Keywords: Atmospheric emissions; Correlation; Operational and environmental performance metrics; Thermoelectric power plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira em 2016.	4
Figura 2 - Matriz Energética Brasileira em 2021.	4
Figura 3 - Geração de Energia por Região no Brasil em 2016 (GWh).	5
Figura 4 - Composição da Geração Elétrica no Nordeste em 2016 (GWh).	5
Figura 5 - Bandeiras Tarifárias.	8
Figura 6 - Ciclo Combinado.	10
Figura 7 - Visão Geral de uma Usina Termoelétrica.	13
Figura 8 - Sala de Máquinas de uma Usina Termoelétrica.	14
Figura 9 - Subestação 230 kV na usina.	15
Figura 10 - Padrões de Emissões Atmosféricas.	16
Figura 11 - Emissões de CO ₂ e O ₂ versus horímetro para o motor A.	21
Figura 12 - Emissões de MP, SO _x e NO _x versus horímetro – Motor A.	21
Figura 13 - Emissões de MP e SO _x versus NO _x para o motor G.	24
Figura 14 - Emissões de CO ₂ e O ₂ versus NO _x para o motor G.	24
Figura 15 - Variação do Consumo Específico de Combustível ao longo de 5 anos de operação da usina.	27
Figura 16 - Variação do Rendimento do Grupo Gerador ao longo de 5 anos de operação da usina.	27
Figura 17 - Rendimento versus Consumo Diário de Combustível.	28
Figura 18 - Rendimento versus Geração Diária de Energia.	28
Figura 19 - Emissões de CO ₂ e O ₂ versus Consumo de Combustível – Motor B.	37
Figura 20 - Emissões de MP, SO _x e NO _x versus Consumo de Combustível – Motor B.	37
Figura 21 - Emissões de CO ₂ e O ₂ versus Potência Média Diária – Motor C.	38
Figura 22 - Emissões de MP, SO _x e NO _x versus Potência Média Diária – Motor C.	38
Figura 23 - Emissões de CO ₂ e O ₂ versus Geração Diária – Motor D.	39
Figura 24 - Emissões de MP, SO _x e NO _x versus Geração Diária – Motor D.	39
Figura 25 - Emissões de SO _x e NO _x versus Material Particulado – Motor E.	40
Figura 26 - Emissões de CO ₂ e O ₂ versus Material Particulado – Motor E.	40
Figura 27 - Emissões de MP e NO _x versus SO _x – Motor F.	41
Figura 28 - Emissões de CO ₂ e O ₂ versus SO _x – Motor G.	41
Figura 29 - Emissões de MP, SO _x e NO _x versus CO ₂ – Motor H.	42
Figura 30 - Emissões de O ₂ versus CO ₂ - Motor H.	42
Figura 31 - Emissões de MP, SO _x e NO _x versus O ₂ – Motor A.	43
Figura 32 - Emissões de CO ₂ versus O ₂ – Motor A.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Maiores Usinas Termoelétricas do Brasil por Capacidade Instalada.....	7
Tabela 2 - Tipos de Combustível x Intensidade das Emissões.	12
Tabela 3 - Parâmetros do motor WÄRTSILÄ 20V32.	14
Tabela 4 - Níveis de Correlação entre as Métricas Operacionais e Ambientais para o Motor A.....	20
Tabela 5 - Níveis de Correlação mais relevantes.....	22
Tabela 6 - Correlação entre Emissões Atmosféricas para o motor F.....	23
Tabela 7 - Análise Estatística - SFOC e Rendimento.	26
Tabela 8 - Coeficientes de Correlação – Rendimento.	26
Tabela 9 - Níveis de Correlação – Motor A.	32
Tabela 10 - Níveis de Correlação – Motor B.....	32
Tabela 11 - Níveis de Correlação – Motor C.....	32
Tabela 12 - Níveis de Correlação – Motor D.	33
Tabela 13 - Níveis de Correlação – Motor E.....	33
Tabela 14 - Níveis de Correlação – Motor F.....	33
Tabela 15 - Níveis de Correlação – Motor G.	33
Tabela 16 - Níveis de Correlação – Motor H.	34
Tabela 17 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor A.	34
Tabela 18 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor B.....	34
Tabela 19 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor C.....	35
Tabela 20 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor D.	35
Tabela 21 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor E.....	35
Tabela 22 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor F.....	36
Tabela 23 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor G.	36
Tabela 24 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor H.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CVU	Custo Variável Unitário
GEE	Gases do Efeito Estufa
HFO	<i>Heavy Fuel Oil</i> (Óleo Combustível Pesado)
MP	Material Particulado
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
PCI	Poder Calorífico Inferior
PPT	Programa Prioritário de Termoelétricas
PTN	Potência Térmica Nominal
RDO	Registro Diário de Operação
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SFOC	<i>Specific Fuel Oil Consumption</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SO _x	Óxidos de Enxofre
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos do Trabalho.....	2
1.2	Estrutura do Trabalho	2
2	Fundamentação Teórica.....	3
2.1	Geração Elétrica no Brasil	3
2.2	Usinas Termoelétricas.....	6
2.2.1	Histórico de Usinas Termoelétricas no Brasil	6
2.2.2	Despacho de Usinas Termoelétricas	8
2.2.3	Funcionamento de Usinas Termoelétricas	9
2.2.4	Emissões Atmosféricas.....	10
3	Objeto de Estudo	13
3.1	Geração de Energia	13
3.2	Monitoramento de Emissões Atmosféricas.....	16
4	Análises Realizadas	18
4.1	Métricas de Desempenho	18
4.2	Análises de Correlação entre as Métricas	19
4.2.1	Análises de Correlação entre Métricas Operacionais e Ambientais	20
4.2.2	Análises de Correlação entre Métricas Ambientais	23
4.3	Análise da Relação entre Consumo Específico e Rendimento.....	24
5	Conclusões.....	29
	Referências	30
	APÊNDICE A – Tabelas de Correlação.....	32
	APÊNDICE B – Gráficos de Variação das Emissões em função das Métricas de Desempenho	37

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de pesquisas em usinas termoelétricas é de grande relevância, devido a participação destas na matriz energética brasileira. O trabalho aqui descrito tem como objeto de estudo uma usina termoelétrica e as análises desenvolvidas foram focadas em indicadores ambientais e operacionais desta usina.

Usinas termoelétricas geram energia elétrica a partir da queima de combustíveis, que aquecem uma caldeira, transformando a água presente nesta em vapor, movendo turbinas que acionam um gerador elétrico.

A principal razão para o Brasil ter investido em termoelétricas é o esgotamento das fontes de energia hidrelétrica nas proximidades dos grandes centros, o que tem elevado os custos dos novos projetos situados cada vez mais distantes dos centros de consumo (COELHO, 2015).

As usinas termoelétricas podem ser construídas próximas aos centros de consumo, o que gera uma grande economia na construção das linhas de transmissão, já que elas podem ser mais curtas, o que é uma vantagem em relação às demais formas de geração.

Porém, as usinas termoelétricas também apresentam certas desvantagens em relação às hidroelétricas, pois acabam tendo maior gasto na produção de energia devido ao aumento constante no preço dos combustíveis usados nas termoelétricas. Além disto, o transporte desses combustíveis é um fator de complicação no processo de geração, já que este muitas vezes ocorre por meio de carretas, que geram trânsito e altos custos (COELHO, 2015).

Além do custo na produção, há o possível dano ao meio ambiente, tanto na extração da matéria-prima, que é usada como combustível, como na geração de energia com a liberação de emissões atmosféricas, por exemplo: monóxido de carbono, dióxido de carbono e dióxido de enxofre (COLOSSI, 2012).

Sabe-se que algumas características operacionais das usinas termoelétricas influenciam a magnitude das emissões atmosféricas, como por exemplo, o tipo de combustível utilizado e as características dos geradores (COELHO, 2015; IEMA, 2016).

Diante do exposto, o estudo sobre a relação entre características operacionais de uma termoeétrica e emissões atmosféricas se mostra relevante em busca da melhoria da eficiência na produção da energia, tanto no contexto operacional quanto ambiental.

Além disso, outro parâmetro relevante para ser analisado em usinas termoeétricas é o rendimento do grupo gerador, que reflete a eficiência do processo de geração, fator de grande interesse por parte dessas usinas, principalmente pelos impactos financeiros que este fator pode causar.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo do trabalho é a realização de uma análise documental de relatórios ambientais e de operação de uma usina termoeétrica, buscando obter uma correlação entre métricas de desempenho definidas (operacionais e ambientais). Além disto, também serão realizados estudos sobre o rendimento do grupo gerador e o consumo específico de combustível da usina.

O objeto de estudo foi uma usina termoeétrica brasileira, e foram analisados dados ao longo de anos de operação desta usina, a partir de 2012.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado por meio de seções. No Capítulo 1, conforme visto, estão apresentadas as considerações iniciais e objetivos do trabalho. No segundo capítulo se encontra a fundamentação teórica do trabalho, na qual é apresentado um estudo sobre matriz energética brasileira, histórico e despacho das usinas termoeétricas, emissões atmosféricas e o funcionamento dessas usinas. No Capítulo 3, o local de estudo do trabalho é apresentado, juntamente com suas principais características operacionais, com enfoque no estudo dos geradores utilizados. No quarto capítulo, são definidas as métricas de desempenho que serão utilizadas nas análises realizadas. Em seguida, as análises são desenvolvidas e explicadas. Por fim, são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho no Capítulo 5, seguidas das referências e dos apêndices.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre a matriz energética brasileira, mostrando a relevância da geração termoelétrica no país. Em seguida, o estudo é direcionado às usinas termoelétricas, objeto de análise do trabalho.

2.1 GERAÇÃO ELÉTRICA NO BRASIL

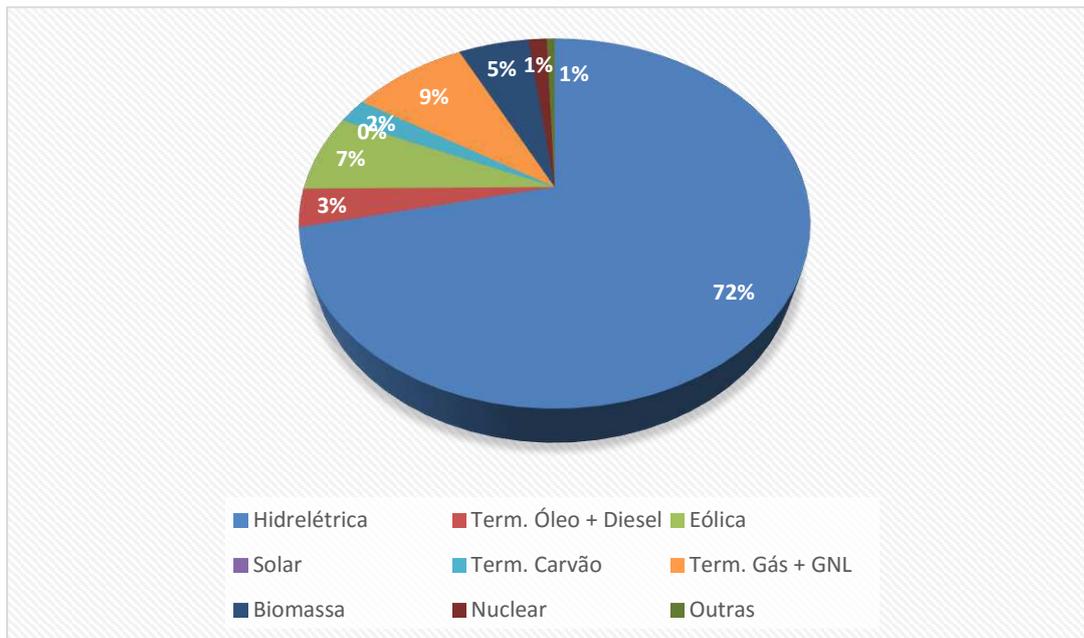
Para que seja possível entender a importância da geração termoelétrica no Brasil, faz-se necessário estudar o comportamento da matriz energética brasileira, ou seja, como a geração elétrica no país é distribuída dentre as variadas fontes possíveis.

A geração de energia elétrica no Brasil é majoritariamente realizada a partir das hidroelétricas, devido à grande capacidade dos mananciais do país. Porém, nos últimos anos, devido à crise hídrica que está instaurada no Brasil, com mais gravidade na região Nordeste, a geração hidrelétrica caiu de produção, o que teve que ser compensado principalmente pela geração termoelétrica e eólica.

Na Figura 1, está exibida a matriz energética brasileira no ano de 2016. Pode-se observar que mesmo com a crise hídrica, cerca de 72% da geração brasileira se dá pelas hidrelétricas, em segundo lugar, as usinas termoelétricas, que totalizam 19% da geração, sendo a mais participativa a usina termoelétrica a gás, representando 9% do total. Também é válido ressaltar a participação da geração eólica, totalizando 7%.

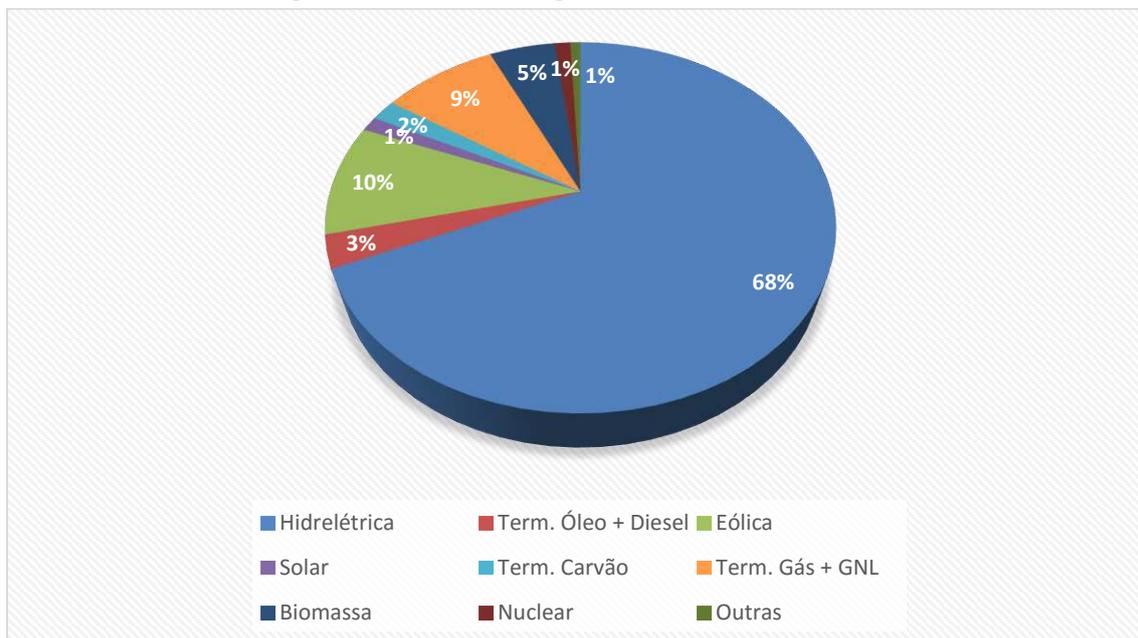
O ONS (Operador Nacional do Sistema) também fornece uma estimativa de como será a matriz energética no ano de 2021, mostrada na Figura 2. Pode-se observar uma redução de 4% na geração hidrelétrica, devido à crise hídrica já mencionada, o que é compensado por um crescimento de 3% da geração eólica e de 1% da geração solar. A participação das usinas termoelétricas se manterá percentualmente constante.

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira em 2016.



Fonte: ONS (2017).

Figura 2 - Matriz Energética Brasileira em 2021.



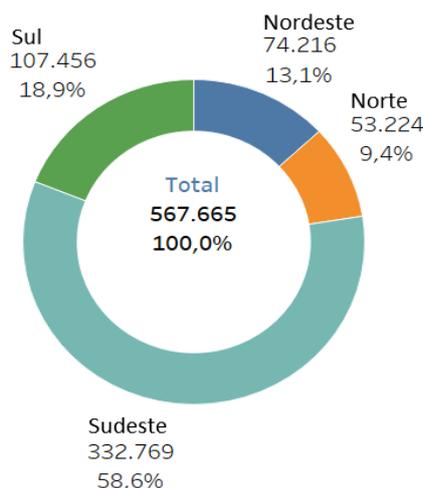
Fonte: ONS (2017).

Também é relevante analisar a participação por região na geração brasileira, dados estes que também são fornecidos pelo ONS. Para esta análise, foi escolhido o intervalo de meses de janeiro a outubro de 2017.

Na Figura 3 é apresentada a composição da geração de energia elétrica no Brasil por região (subsistema). O subsistema Sudeste/Centro-Oeste é responsável pela maior parte da geração brasileira, devido à localização de muitas usinas hidrelétricas nessa região, como as usinas de Ilha Solteira, Furnas, Itumbiara, Três Marias, entre outras. Além destas, a maior usina do país, Itaipu, também faz parte do subsistema do Sudeste/Centro-Oeste, com capacidade de geração de, aproximadamente, 14.000 MW.

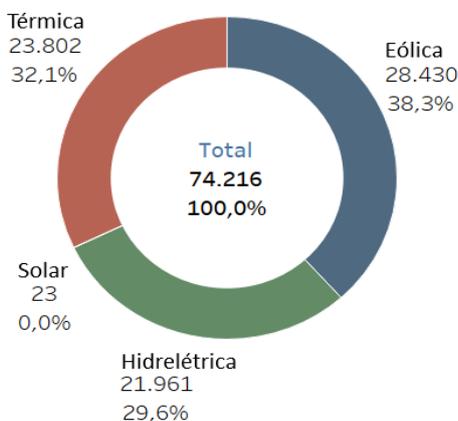
Pode-se também analisar a participação do subsistema Nordeste na geração brasileira, que corresponde a cerca de 13% do total. Na Figura 4, a composição da geração nordestina é mostrada (dados de Janeiro/2017 até Agosto/2017). A partir do gráfico, pode-se verificar a grande participação da geração eólica, com 44%, seguida pelas termelétricas com 33% e o baixo número da geração hidrelétrica, que é fruto da crise hídrica que assola os reservatórios nordestinos.

Figura 3 - Geração de Energia por Região no Brasil em 2016 (GWh).



Fonte: ONS (2017).

Figura 4 - Composição da Geração Elétrica no Nordeste em 2016 (GWh).



Fonte: ONS (2017).

A partir da análise da matriz energética, pode-se observar a importância da geração termoelétrica no contexto energético brasileiro e, principalmente, no Nordeste, onde um terço da geração foi suprida pelas termoelétricas. Sendo assim, o enfoque do trabalho aqui descrito foi voltado para o estudo de usinas termoelétricas.

2.2 USINAS TERMOELÉTRICAS

Nesta seção é feita uma análise histórica de usinas termoelétricas no Brasil. Posteriormente, são definidos conceitos essenciais para o entendimento do funcionamento dessas usinas. Por fim, é mostrado como o ONS realiza o despacho dessas usinas e qual é o impacto das emissões atmosféricas nesse tipo de geração de energia.

2.2.1 HISTÓRICO DE USINAS TERMOELÉTRICAS NO BRASIL

O início das usinas termoelétricas no Brasil se deu em 1883 na cidade de Campos-RJ, a primeira usina elétrica movida a vapor, com capacidade de 52 kW e com intuito de alimentar uma carga de aproximadamente 40 lâmpadas (STUCHI *et al.*, 2015).

O crescimento das usinas foi intenso após a 1ª Guerra Mundial, pois com a dificuldade de importar produtos, muitas indústrias foram instaladas no país. Em 1930, o Brasil já contava com 891 geradoras de energia, sendo 541 hidrelétricas, 337 térmicas e 13 mistas (GAZETA MERCANTIL, 2009).

Em 1940, o uso das usinas termoelétricas foi regulamentado no país pelo presidente Getúlio Vargas, integrando-as ao Código das Águas. Logo em seguida, nos anos de 1945 e 1952, grandes passos foram tomados para a expansão do setor elétrico brasileiro, com a criação da CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) e a CEMIG (Centrais Elétricas de Minas Gerais) (ELETROBRÁS, 2012).

No ano de 1954, duas grandes geradoras foram inauguradas, a usina hidrelétrica de Paulo Afonso I, a primeira construída no Rio São Francisco e a usina termoelétrica de Piratininga, a óleo combustível, a primeira termoelétrica de grande porte do Brasil (ELETROBRÁS, 2012).

Na década de 60, foi criado o Ministério de Minas e Energia, fruto do Plano de Metas do presidente Juscelino Kubitschek. Pouco tempo depois, foi criada a Eletrobrás, constituída em 1962 pelo presidente João Goulart para coordenar o setor elétrico brasileiro. Em 1968, foi inaugurada a usina termoeétrica de Santa Cruz-RJ, que nos dias atuais é uma das maiores do Brasil (ELETROBRÁS, 2012).

Na década de 80, foi inaugurada a maior hidroelétrica do mundo, a usina de Itaipu, com 12.600 MW de capacidade instalada. No ano 2000, foi criado o Programa Prioritário de Termoeletricas (PPT) pelo presidente Fernando Henrique Cardoso, estimulando a implantação de várias usinas a gás natural no Brasil, como as usinas: Norte Fluminense, com 868 MW de capacidade instalada, inaugurada em 2004; Mário Lago, inaugurada em 2004 na cidade de Macaé, com 923 MW de capacidade instalada; AES Uruguaiana, no Rio Grande do Sul, com 640 MW de capacidade instalada, inaugurada em 2000; Governador Leonel Brizola, com capacidade instalada de 1.036 MW, maior do Brasil, inaugurada em 2006 na cidade de Duque de Caxias-RJ; Termopernambuco, maior do Nordeste inaugurada em 2004, com 532 MW de capacidade instalada.

Na Tabela 1 são apresentadas as maiores usinas termoeletricas do Brasil. É importante observar que as 8 maiores do país têm como combustível o gás natural. Também é pertinente analisar que as 4 maiores estão instaladas no estado do Rio de Janeiro.

Tabela 1 - Maiores Usinas Termoeletricas do Brasil por Capacidade Instalada.

Petrobrás	Duque de Caxias	1058 MW	Gás Natural
Furnas	Santa Cruz	1000 MW	Gás Natural
Petrobrás	Macaé	923 MW	Gás Natural
Termelétrica Norte Fluminense	Macaé	868 MW	Gás Natural
AES Uruguaiana	Uruguaiana	640 MW	Gás Natural
Termopernambuco	Ipojuca	532 MW	Gás Natural
Cuiabá	Cuiabá	530 MW	Gás Natural
Petrobrás	Araucária	484 MW	Gás Natural
Baixada Santista Energia	São Paulo	470 MW	Óleo Combustível
CGTEE	Candiota	446 MW	Carvão Mineral

Fonte: GRANDES CONSTRUÇÕES (2010).

É válido ressaltar a presença das usinas termoelétricas de pequeno porte. Estas usinas são instaladas principalmente em indústrias para geração própria, podendo ser utilizadas como *backup* ou até mesmo para atender a demanda das indústrias nos horários de ponta, quando a energia é mais cara.

Na região Norte, as usinas de pequeno porte também são bastante presentes, devido ao isolamento de algumas regiões do SIN. É comum em comunidades ribeirinhas, a presença de geradores a óleo combustível.

Atualmente, segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), o Brasil possui 3.003 usinas termoelétricas em operação, totalizando 42.861.832 kW de potência, com previsão de aumento de 6.865.560 kW oriundos de 29 usinas em construção e 117 outorgadas (ANEEL, 2018).

2.2.2 DESPACHO DE USINAS TERMOELÉTRICAS

O ONS é o órgão responsável por realizar o despacho (acionamento) das usinas termoelétricas. O principal fator para determinar quando e quais usinas serão despachadas é o critério econômico, pela chamada ordem de mérito. As usinas são despachadas a partir das de menor custo operacional, como as usinas hidrelétricas e eólicas. Em seguida, são despachadas as usinas termoelétricas mais baratas, o que é bastante influenciado pelo tipo do combustível, sendo as usinas a gás as mais baratas.

Pelo fato da geração térmica ser mais cara, o despacho dessas usinas influencia diretamente o preço da tarifa da energia elétrica. Este aumento é regulamentado a partir das bandeiras tarifárias, que são determinadas pela potência gerada pelas térmicas. Na Figura 5 é apresentada a relação das bandeiras tarifárias com a geração térmica, além do aumento da tarifa para cada bandeira.

Figura 5 - Bandeiras Tarifárias.

Bandeira verde	Hidrelétricas operam normalmente. (geração térmica até R\$ 211,28/MWh)	Não há alteração no valor da tarifa de energia.	
Bandeira amarela	Usinas térmicas ativadas (geração térmica de R\$ 211,28/MWh a R\$ 422,56/MWh)	Acréscimo na sua conta R\$ 1,00 a cada 100kWh.	
Bandeira vermelha Patamar 1	Usinas térmicas ativadas e alta demanda. (geração térmica de R\$ 422,56/MWh até R\$ 610/MWh)	Acréscimo na sua conta R\$ 3,00 a cada 100kWh.	
Bandeira vermelha Patamar 2	Usinas térmicas ativadas e alta demanda. (geração térmica maior ou igual a R\$ 610/MWh)	Acréscimo na sua conta R\$ 5,00 a cada 100kWh.	

Fonte: CPFL (2017).

Com a crise hídrica e a redução da geração hidrelétrica, no mês de novembro de 2017, a bandeira vermelha patamar 2 foi atingida, devido à grande parte das usinas termoeletricas estarem funcionando.

O critério utilizado para o despacho das usinas termoeletricas é o CVU (Custo Variável Unitário), que, no seu cálculo, leva em consideração as despesas operacionais e de manutenção da usina, além dos custos com combustíveis. Mensalmente, o agente gerador informa ao ONS, o CVU da usina para que sejam realizados estudos para efetuar o despacho da maneira mais econômica possível.

2.2.3 FUNCIONAMENTO DE USINAS TERMOELÉTRICAS

O processo fundamental de funcionamento de usinas termoeletricas é a conversão de energia térmica em energia mecânica e esta em energia elétrica. A primeira conversão se dá pela uso de fluidos, que, em seu processo de expansão, produzem trabalho em turbinas térmicas (REIS, 2015).

A produção de energia térmica acontece pela queima de combustíveis fósseis (gás, óleo ou carvão). Esta combustão pode ser de dois tipos: a combustão externa, em que o combustível não entra em contato com o fluido de trabalho. Este processo é usado em usinas termoeletricas a vapor, nas quais o combustível aquece as caldeiras, transformando a água presente nestas em vapor, que produz trabalho nas turbinas; e a combustão interna, em que a combustão se efetua sobre uma mistura de ar e combustível, assim, o fluido de trabalho será uma composição destes dois fluidos. Este processo é comumente usado em turbinas a gás e máquinas térmicas a pistão (REIS, 2015).

Os principais combustíveis utilizados nas máquinas com combustão externa são: óleo, carvão, biomassa e derivados pesados do petróleo. Na combustão interna, os mais utilizados são o gás natural e o óleo diesel (REIS, 2015).

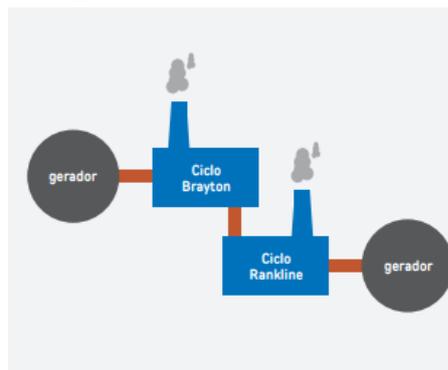
Outro fator importante a ser analisado é o ciclo termodinâmico utilizado na geração, que interfere na eficiência e nas emissões atmosféricas do processo. Os tipos de ciclo são: ciclo Rankine – opera com vapor produzido em uma caldeira, o qual é levado a uma turbina que produzirá energia mecânica nas pás (rotação) e perderá pressão. A água presente na caldeira se transforma em vapor a partir da queima dos combustíveis que geram emissões atmosféricas. O vapor é condensado e volta à caldeira

no fim do processo. Portanto, pode-se concluir que o ciclo Rankine caracteriza a combustão externa. (IEMA, 2016).

O ciclo Brayton utiliza turbinas a gás, em que a adição de calor ocorre à pressão constante. O gás natural é injetado em uma câmara de combustão junto com o ar que vem do compressor. Após a queima dessa mistura, os gases são direcionados para a turbina do gerador, acionando o movimento giratório das pás. Os gases são emitidos para a atmosfera após passarem pela turbina. Este ciclo caracteriza um processo de combustão interna (IEMA, 2016).

O ciclo combinado resulta da união dos anteriores, que está mostrado na Figura 6. Para esta combinação, utiliza-se uma caldeira de recuperação para aproveitar a energia contida nos gases de exaustão do ciclo Brayton para aquecer a água e gerar o vapor necessário para o ciclo Rankine. Caso necessário, pode ser queimado mais combustível nessa caldeira (IEMA, 2016).

Figura 6 - Ciclo Combinado.



Fonte: IEMA (2016).

Também é possível a geração a partir dos motores de combustão, que convertem energia elétrica em trabalho mecânico. A combustão se dá dentro do equipamento, em um mecanismo constituído por pistão, biela e virabrequim, em que o movimento do pistão é transformado em rotação para o eixo do gerador. Neste caso, as emissões atmosféricas ocorrem dentro do próprio motor (IEMA, 2016).

2.2.4 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Os empreendimentos termoeletrônicos têm contribuição significativa para o montante de emissões na região onde operam, devido ao porte das usinas e à quantidade de combustível consumido diariamente. Como estas usinas podem se concentrar

próximas a centros urbanos, as emissões atmosféricas podem representar um agravante na qualidade do ar da região. Sendo assim, é de vital importância realizar um estudo e debate entre as políticas energéticas e ambientais para conhecer as implicações destas emissões (IEMA, 2016).

Alguns fatores influenciam nas emissões atmosféricas, como a tecnologia de geração utilizada ou o ciclo termodinâmico das máquinas, explicado na subseção anterior, e principalmente, o tipo de combustível utilizado. As principais emissões provenientes das usinas termoelétricas são apresentadas a seguir.

- **GEE – Gases do Efeito Estufa:** O dióxido de carbono (CO_2), principal gás do efeito estufa, é um dos produtos da combustão em usinas termoelétricas. Sua emissão está diretamente relacionada ao combustível utilizado, bem como à eficiência da conversão de energia na geração;
- **MP – Material Particulado:** É um conjunto de partículas (sólidas ou líquidas) de diâmetro muito pequeno que permanecem em suspensão nos gases exauridos pelas usinas termoelétricas e podem ser emitidos para a atmosfera;
- **NO_x – Óxidos de Nitrogênio:** Os óxidos de nitrogênio são formados sempre que um combustível é queimado na presença de ar. Em altas temperaturas, oxigênio e nitrogênio reagem formando NO e NO_2 ;
- **SO_x – Óxidos de Enxofre:** Os óxidos de enxofre são originados da queima de qualquer material que contém enxofre. As usinas termoelétricas são um dos maiores contribuintes para a emissão desses gases. O dióxido de enxofre (SO_2) constitui a principal parcela das emissões, mas o trióxido (SO_3) também é emitido;
- **Outros:** outras emissões também podem ser provenientes da geração termoelétrica, como o monóxido de carbono (CO), consequência da combustão incompleta. Metais pesados também podem ser emitidos, como chumbo, zinco, cobre, níquel, entre outros (IEMA, 2016).

O tipo de combustível tem grande influência na intensidade das emissões, o que pode ser visto na Tabela 2. Observa-se que as usinas a carvão mineral são as mais danosas ao ambiente no quesito das emissões atmosféricas, enquanto as usinas a óleo apresentam comportamento mediano e as usinas a gás apresentam a menor intensidade

de emissões de SO_x e MP, alta quantidade de emissões de NO_x e média intensidade de emissões de CO₂.

Tabela 2 - Tipos de Combustível x Intensidade das Emissões.

	SO _x	NO _x	MP	CO ₂
Carvão Mineral	Alto	Alto	Alto	Alto
Óleo Diesel e Óleo Combustível	Médio	Médio	Médio	Médio
Gás Natural	Baixo	Alto	Baixo	Médio

Fonte: IEMA (2016).

Para controlar o nível destas emissões atmosféricas, existem resoluções que definem limites (padrões) no âmbito da geração de energia. Estas também definem a periodicidade do monitoramento, que pode ser semestral, anual ou contínuo.

A Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná (SEMA), a partir da Resolução nº 016/2014, definiu critérios para o controle da qualidade do ar, por meio de padrões de emissão e critérios de atendimento para fontes industriais, padrões de condicionamento e definição de metodologias para determinação das emissões (SEMA, 2014). Esta resolução será descrita posteriormente (Seção 3.1) para a análise de emissões atmosféricas na usina termoeletrica em estudo.

A seguir, será apresentada a usina termoeletrica objeto de estudo deste trabalho.

3 OBJETO DE ESTUDO

No trabalho, o objeto de estudo foi uma usina termoeletrica brasileira, cujo nome não será citado por motivos de confidencialidade. A usina possui uma capacidade instalada de 169 MW e atende a 36 distribuidoras, em vários estados. Uma visão geral da usina pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 - Visão Geral de uma Usina Termoeletrica.



Fonte: TEVISA (2018).

3.1 GERAÇÃO DE ENERGIA

Os motores utilizados na usina são da empresa finlandesa WÄRTSILÄ, que atua no Brasil desde 1990, com cerca de 700 funcionários em oito estados: Rio de Janeiro, Amazonas, Rondônia, Paraíba, Ceará, Maranhão e Espírito Santo. Ao todo, estão presentes no país 29 usinas termoeletricas, totalizando mais de 2,5 GW de potência instalada (WÄRTSILÄ, 2017).

A geração de energia na usina é realizada a partir de 20 motores 20V32 da WÄRTSILÄ, totalizando os 169 MW de capacidade instalada da usina. As especificações deste gerador estão mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros do motor WÄRTSILÄ 20V32.

Frequência	60 Hz
Velocidade	750 rpm
Potência Elétrica Nominal	8.730 kW
Taxa de Aquecimento	7.779 kJ/kWh
Eficiência Elétrica	46,2 %
Dimensões	13 x 3,3 x 4,3 m
Peso	130.000 kg
Combustível	HFO

Fonte: WÄRTSILÄ (2012).

Os motores são reunidos na sala de máquinas da usina (um exemplo dessas salas pode ser visto na Figura 8) e divididos em grupos de 5, constituindo as 4 torres, compostas pelas chaminés dos motores. As torres podem ser vistas ao fundo na Figura 7.

Figura 8 - Sala de Máquinas de uma Usina Termoelétrica.



Fonte: TEVISA (2018).

A respeito do funcionamento destes motores, este se dá a partir da combustão interna, que já foi explicada em seções anteriores, sendo caracterizado como um motor “ciclo diesel” de quatro tempos, com injeção direta de combustível.

Segundo a WÄRTSILÄ, estes motores são projetados para operar sob regime de “starts and stops”, ou seja, eles possuem a flexibilidade de acionamento e desligamento sem danificar o motor.

Esta característica é importante no contexto das usinas termoelétricas devido ao fato do funcionamento destas ser condicionado pelo despacho da usina por meio do ONS, o que necessita desta flexibilidade (PRADÈRE, 2017).

O óleo combustível utilizado na usina é o OCB1, óleo com menor teor de enxofre e menor limite de viscosidade, segundo à ANP (Agência Nacional do Petróleo).

São acoplados aos motores WÄRTSILÄ, geradores trifásicos síncronos do fabricante AVK, que geram uma saída regulável, a partir do regulador Unitrol 1000, desde 3,3 até 13,8 kV.

A tensão na saída dos geradores é de 13,8 kV, que é elevada para a tensão de 230 kV a partir de dois transformadores que se encontram na subestação própria da usina, que interliga a usina às linhas de transmissão da CHESF. A subestação ainda conta com disjuntores a SF6, chaves-seccionadoras, transformadores de potencial (TP) e transformadores de corrente (TC) e para-raios. Na Figura 9 é apresentada uma imagem da subestação em questão.

Figura 9 - Subestação 230 kV na usina.



Fonte: o próprio autor.

3.2 MONITORAMENTO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Devido à preocupação com a questão ambiental, torna-se relevante realizar o monitoramento de métricas ambientais (emissões atmosféricas) em usinas termoelétricas. Na usina em questão, de 2011 a 2016, este monitoramento foi realizado por amostragem, ou seja, foram realizadas medições pontuais nas chaminés, uma vez a cada ano, por um laboratório especializado. A partir das medições realizadas, foram gerados relatórios.

As medições proporcionaram analisar as seguintes emissões: material particulado (MP), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos totais (THC).

Para a análise das emissões, foram atendidos os procedimentos de amostragem e análise presentes nas normas técnicas em vigor. As seguintes normas foram utilizadas: ABNT-NBR 12019/90, 12021/90 e o método EPA 0030 – USA.

A empresa realiza medições das seguintes emissões atmosféricas: CO, CO₂, O₂, THC (Hidrocarbonetos totais), MP (Material particulado), SO_x e NO_x.

A resolução nº 016/2014 da SEMA-PR (Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos) define limites para as emissões atmosféricas. Esta resolução é utilizada como referência para os monitoramentos realizados na usina. Para definir os padrões, são levados em consideração: a natureza do processo (geração de energia), o tipo de combustível (óleo combustível), a potência térmica nominal da usina e o tipo da combustão realizada no processo (interna). A partir destes parâmetros, pode-se encontrar a tabela que corresponde aos padrões adequados para uma usina termoelétrica, mostrada na Figura 10.

Figura 10 - Padrões de Emissões Atmosféricas.

Potência Térmica Nominal	Densidade calorimétrica	MP-total	CO	NO _x		SO _x	Automonitoramento Amostragem	
				óleo até 1,0% N ¹⁾	óleo acima de 1,0% N ¹⁾		Parâmetros	Frequência
MW		mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³		
Até 10	20% equivalente ao Padrão I da Escala Ringelmann ²⁾	NA	500	NA	NA	NA	MP-total, CO, NO _x , SO _x e O ₂	Semestral
Entre 10 e 50		250	500	820	820 · (0,4+0,6N)	1.800		
Entre 50 e 100		100	500	620	620 · (0,4+0,6N)	1.800		
Acima de 100		75	500	620	620 · (0,4+0,6N)	1.800	MP-total, CO, NO _x , SO _x e O ₂	Contínuo
		Ni: 1,0 V: 5,0					MP-inorgânico	Semestral

Fonte: SEMA (2014).

Primeiramente, para utilizar esta tabela, é necessário determinar a potência térmica nominal (PTN) da usina em questão, conforme expresso por (1):

$$PTN = Consumo \left(\frac{kg}{h} \right) \times PCI \text{ do combustível} \left(\frac{MJ}{kg} \right). \quad (1)$$

O PCI (Poder Calorífico Inferior) é uma grandeza característica dos combustíveis e representa a energia liberada na forma de calor durante um processo de oxidação de um combustível. A unidade deste parâmetro é joule por quilograma (J/kg).

Segundo os dados extraídos do relatório de emissões atmosféricas do ano de 2016, tem-se:

$$Consumo \text{ de OCB1} = 1754 \text{ kg/h} \quad (2)$$

$$PCI \text{ do combustível} = 41,22 \text{ MJ/kg} \quad (3)$$

$$PTN = 1754 \times 41,22 = 72299,88 \text{ MJ/h} \quad (4)$$

Para realizar a conversão de MJ/h para MW, deve-se dividir por 3600 s/h:

$$PTN = \frac{72299,88}{3600} = 20,08 \text{ MW} \quad (5)$$

Portanto, a usina se enquadra no segundo nível da tabela da SEMA, com potência térmica nominal entre 10 e 50 MW. Para realizar as análises das emissões, a SEMA utiliza o oxigênio a 17%.

No capítulo seguinte, serão descritas as análises realizadas neste trabalho, que se dividem em análises de correlação e de consumo específico e rendimento.

4 ANÁLISES REALIZADAS

Neste capítulo, será descrito, inicialmente, o procedimento de escolha das métricas de desempenho operacionais, baseado nos registros de operação da usina. Posteriormente, serão descritas as análises realizadas, sendo estas: análises de correlação, nas quais foram calculados os níveis de correlação entre as métricas de desempenho; e análises de consumo específico e rendimento, nas quais essas grandezas foram analisadas ao longo de 5 anos de operação da usina.

4.1 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

O trabalho se intitula: “Análise de Métricas de Desempenho de Geradores em uma Usina Termoelétrica”. Portanto, o primeiro passo para realizar as análises foi definir quais seriam estas métricas de desempenho de interesse. Inicialmente, foram escolhidos parâmetros presentes nos RDOs (Registro Diário de Operação) da usina. Estes documentos contêm todas as informações relevantes sobre o funcionamento da termoelétrica por dia, tendo os motores operado ou não.

A partir dos RDOs foram escolhidos índices desses documentos para compor parte das análises de correlação que serão descritas a seguir. Estes índices foram: geração diária de energia, potência média diária, horímetro do motor e consumo diário de combustível, os quais foram denominados de métricas de desempenho operacionais.

Segundo Kondo (2007), os níveis das emissões atmosféricas em usinas termoelétricas são considerados índices de desempenho ambientais, assim, estes níveis também foram inseridos nas análises de correlação.

Por fim, outros dois índices foram analisados, a saber: o consumo específico de combustível (SFOC – *Specific Fuel Oil Consumption*), dado em kg/MWh, parâmetro que reflete a quantidade de combustível necessária para gerar 1 MWh; e a eficiência ou rendimento dos motores, parâmetro essencial para usinas termoelétricas.

A definição dos índices de interesse objetivou, portanto, identificar a análise de correlação entre métricas de desempenho operacionais e ambientais, assim como o impacto destas na geração de energia elétrica em uma usina termoeletrica.

4.2 ANÁLISES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS MÉTRICAS

A análise inicial constituiu no estudo dos relatórios de emissões atmosféricas elaborados pelo laboratório de análise, juntamente com os RDOs e planilhas de análise de controle dos dias em que funcionários do laboratório estiveram na usina realizando medições. Foram comparadas, portanto, as métricas de desempenho citadas com as emissões atmosféricas medidas pelo laboratório nos dias específicos dos relatórios. Com isto, foi possível construir tabelas com métricas operacionais e ambientais ao longo dos anos.

O objetivo desta análise foi buscar determinar níveis de correlação entre as emissões atmosféricas e os índices operacionais. Para tanto, foi necessário separar estes parâmetros por motores.

A correlação é um parâmetro estatístico que resulta no grau de dependência entre duas variáveis. Esta análise é pertinente ao tema estudado, já que por meio desta, pode-se entender melhor o comportamento das grandezas, bem como observar se a variação de uma métrica operacional pode interferir diretamente nas emissões atmosféricas.

A classificação do valor da correlação em níveis se dá por:

- Coeficiente de correlação (ρ) entre 0,00 e 0,19: muito fraca;
- Entre 0,20 e 0,39: fraca;
- Entre 0,40 e 0,69: moderada;
- Entre 0,70 e 0,89: forte;
- Entre 0,90 e 1,00: muito forte.

Além disto, o coeficiente pode ser positivo ou negativo, o que corresponde a uma dependência direta ou inversa.

4.2.1 ANÁLISES DE CORRELAÇÃO ENTRE MÉTRICAS OPERACIONAIS E AMBIENTAIS

A partir dos dados disponíveis, determinou-se os índices de correlação entre cada tipo emissão e as métricas operacionais.

Para ilustrar a análise realizada, na Tabela 4 são apresentados os valores dos níveis de correlação entre os parâmetros analisados para o motor A.

Tabela 4 - Níveis de Correlação entre as Métricas Operacionais e Ambientais para o Motor A.

MP – Geração	0,5814	SOx - Geração	0,5485	NOx – Geração	0,7072
MP – Potência	-0,2636	SOx - Potência	0,4039	NOx – Potência	-0,0152
MP - Horímetro	0,1320	SOx - Horímetro	0,1029	NOx – Horímetro	0,3750
MP - Fluxômetro	0,6055	SOx - Fluxômetro	0,5730	NOx - Fluxômetro	0,7315
CO – Geração	-0,1697	CO2 - Geração	0,2814	O2 – Geração	-0,6406
CO – Potência	0,4971	CO2 - Potência	-0,2492	O2 – Potência	0,1276
CO – Horímetro	0,3373	CO2 - Horímetro	0,7663	O2 – Horímetro	-0,6405
CO - Fluxômetro	-0,1820	CO2 - Fluxômetro	0,2751	O2 - Fluxômetro	-0,6595

Fonte: o próprio autor.

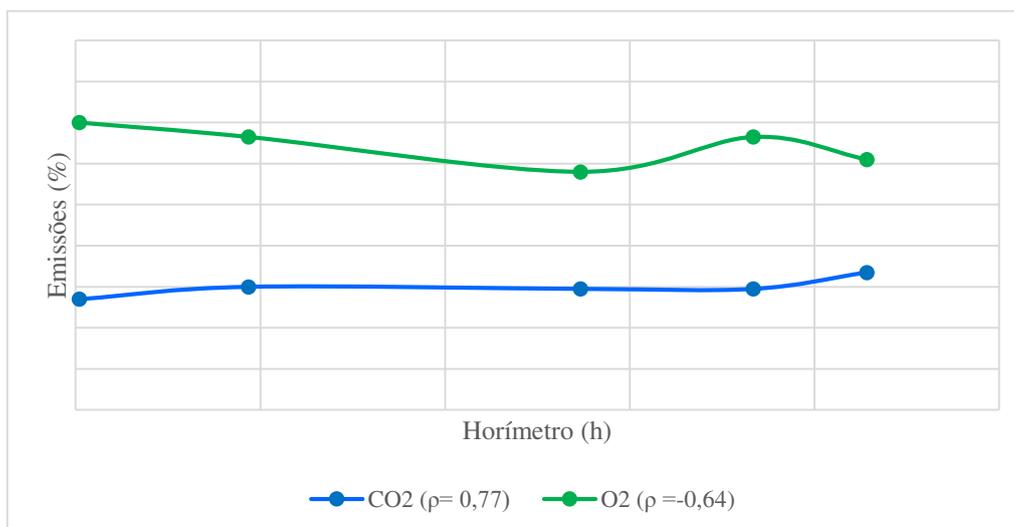
A partir da Tabela 4, pode-se destacar alguns coeficientes de correlação considerados fortes no motor A, como a correlação entre o CO₂ e o horímetro e entre o NOx e o fluxômetro.

Para melhor ilustrar esta análise de correlação, foram gerados gráficos de emissões *versus* os índices operacionais separadamente. Vale ressaltar que os coeficientes de correlação (ρ) entre a emissão e a métrica operacional correspondente estão indicados na legenda dos gráficos. Os níveis das emissões atmosféricas não foram expostos devido a questões de confidencialidade.

Na Figura 11 é apresentado um gráfico das emissões de CO₂ e O₂ *versus* o horímetro no motor A. Pode-se observar que o comportamento mais linear da curva do CO₂ está relacionado ao coeficiente de correlação mais elevado deste parâmetro. O trecho entre o terceiro e o quarto ponto da curva de O₂, que é crescente, provoca o decaimento do coeficiente de correlação entre este parâmetro e o horímetro.

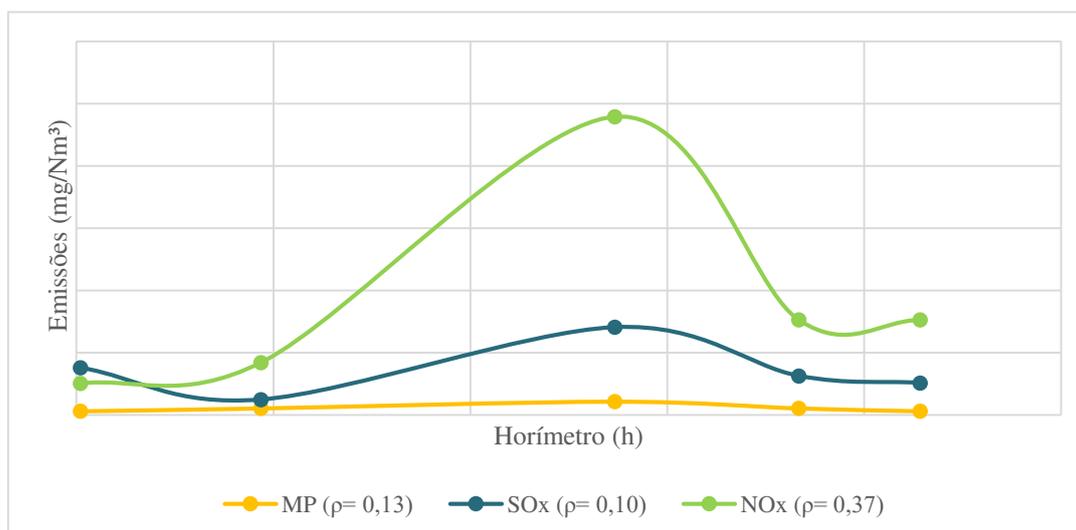
Na Figura 12 são apresentadas as emissões de SOx, MP e NOx *versus* o horímetro, nesta, pode-se observar que o comportamento de subidas e descidas das grandezas acarretam em coeficientes de correlação bastante reduzidos.

Figura 11 - Emissões de CO₂ e O₂ *versus* horímetro para o motor A.



Fonte: o próprio autor.

Figura 12 - Emissões de MP, SO_x e NO_x *versus* horímetro – Motor A.



Fonte: o próprio autor.

Esta análise de correlação foi feita para 8 motores (2 por torre), para comparar os valores obtidos e observar se estes se mantêm próximos (entre os motores) ou se divergem, ou seja, se há diferença significativa em função do motor analisado. O critério de escolha dos motores foi de acordo com a quantidade de dados obtidos de cada motor, escolhendo aqueles que possuem mais dados nos relatórios de emissões atmosféricas. Todas as tabelas dos níveis de correlação podem ser encontradas no Apêndice A deste documento.

Na Tabela 5 são apresentados os 10 valores de coeficientes de correlação mais relevantes (5 valores positivos e 5 negativos). Vale analisar que nenhum par de métricas

operacionais e ambientais aparece repetidamente na tabela, mostrando o comportamento variado dos níveis de correlação entre os motores.

Tabela 5 - Níveis de Correlação mais relevantes.

SO_x - Fluxômetro (Motor C)	0,9690
CO₂ - Potência (Motor H)	0,9427
CO₂ - Horímetro (Motor C)	0,9418
MP - Fluxômetro (Motor H)	0,8610
NO_x - Horímetro (Motor G)	0,8512
SO_x - Potência (Motor H)	-0,9554
O₂ - Fluxômetro (Motor H)	-0,9823
CO - Potência (Motor C)	-0,9823
CO - Geração (Motor C)	-0,9865

Fonte: o próprio autor.

De forma similar ao motor A foram gerados gráficos de emissões *versus* o horímetro. Foram selecionadas outras métricas operacionais para a construção dos gráficos de outros motores. Para o motor B, foram gerados gráficos de emissões *versus* o consumo diário de combustível. No motor C, os gráficos foram de emissões *versus* a potência média diária e para o motor D, a métrica selecionada foi a geração diária. Vale ressaltar, que a escolha dessas métricas para cada motor objetivou construir diferentes gráficos para ilustrar melhor níveis de correlação entre as grandezas. Esses gráficos estão nas Figuras 19 a 24, que se encontram no Apêndice B deste documento.

A partir da realização desta análise para os diferentes motores, pôde-se concluir que a correlação entre as grandezas não segue, necessariamente, um comportamento padrão, já que os coeficientes apresentaram comportamentos diferentes de acordo com o motor analisado. Como exemplo, tem-se: a correlação entre o material particulado e a geração no motor A é de 0,58, enquanto no motor G é de -0,88; ou entre CO₂ e geração que no motor F vale -0,09 e no motor H vale 0,79. Portanto, de acordo com os resultados obtidos, não existe uma regra que defina a correlação entre as métricas operacionais e ambientais escolhidas, para a base de dados analisada.

Diante do exposto, a partir da base de dados disponível, não foi possível avaliar de forma mais aprofundada, o grau de correlação entre métricas operacionais e ambientais de uma usina termoelétrica.

4.2.2 ANÁLISES DE CORRELAÇÃO ENTRE MÉTRICAS AMBIENTAIS

Além das análises feitas entre métricas de desempenho operacionais e ambientais, também foram realizados estudos de correlação entre as emissões. O procedimento realizado foi semelhante ao citado na análise anterior, a partir da construção de tabelas de coeficientes de correlação. Um exemplo pode ser visto na Tabela 6, na qual estão mostrados os níveis de correlação entre as emissões atmosféricas do motor E. As demais tabelas se encontram no Apêndice A deste documento.

Nesta análise, os resultados de correlação, quando comparados entre os motores, tiveram um comportamento com menos variação entre algumas grandezas, como por exemplo a correlação entre MP e NO_x, que é maior do que 0,9 em 7 dos 8 motores analisados, porém, isto não se repete para todas as grandezas.

A exemplo da análise anterior, o tamanho da base de dados não possibilitou determinar uma regra de correlação entre todas emissões atmosféricas.

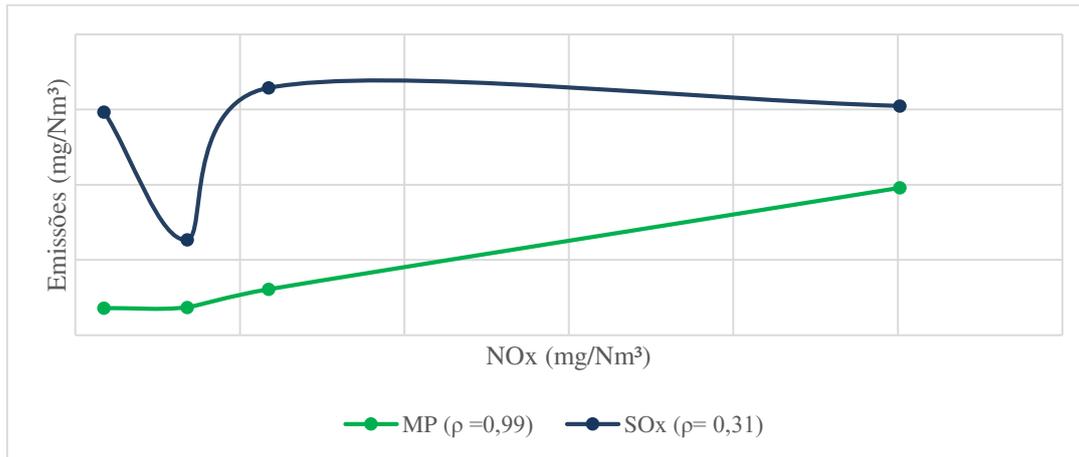
Tabela 6 - Correlação entre Emissões Atmosféricas para o motor F.

MP - SO_x	0,8502	SO_x - MP	0,8502	NO_x - MP	0,9355
MP - NO_x	0,9355	SO_x - NO_x	0,9797	NO_x - SO_x	0,9797
MP - CO	-0,2354	SO_x - CO	-0,2819	NO_x - CO	-0,3202
MP - CO₂	0,5275	SO_x - CO₂	0,0813	NO_x - CO₂	0,2263
MP - O₂	-0,6793	SO_x - O₂	-0,2028	NO_x - O₂	-0,3948
CO - MP	-0,2354	CO₂ - MP	0,5275	O₂ - MP	-0,6793
CO - SO_x	-0,2819	CO₂ - SO_x	0,0813	O₂ - SO_x	-0,2028
CO - NO_x	-0,3202	CO₂ - NO_x	0,2263	O₂ - NO_x	-0,3948
CO - CO₂	0,4495	CO₂ - CO	0,4495	O₂ - CO	0,2210
CO - O₂	0,2210	CO₂ - O₂	-0,7679	O₂ - CO₂	-0,7679

Fonte: o próprio autor.

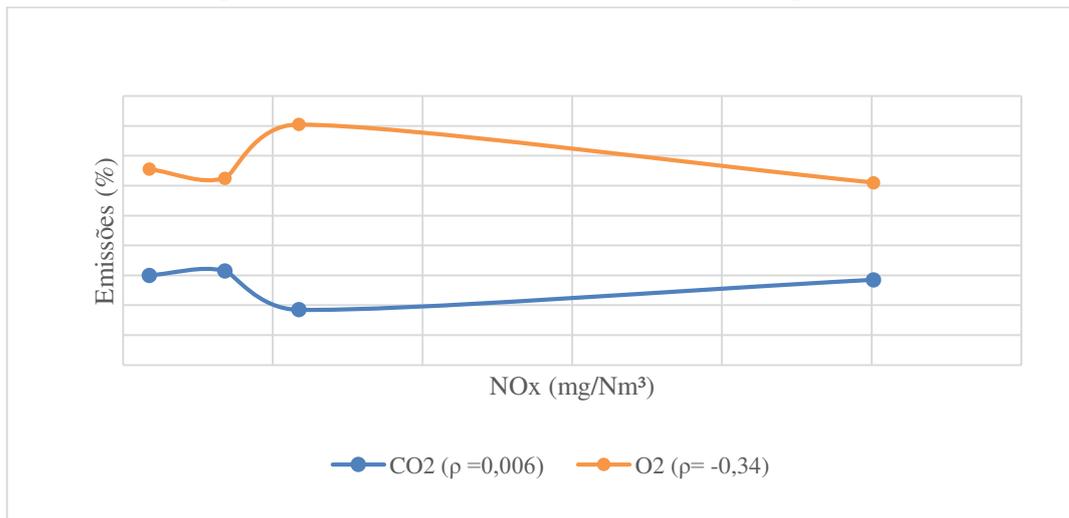
Análogo ao que foi feito na primeira análise, também foram construídos gráficos para melhor observação das correlações. Desta vez, os gráficos foram feitos entre as emissões atmosféricas. Exemplos destes gráficos encontram-se nas Figuras 13 e 14. Nestes, é interessante observar as curvas dos diferentes níveis de correlação, como na Figura 13, na qual a curva MP-NO_x, que possui correlação de 0,99, muito próximo do valor máximo, assim como na Figura 14, a curva CO₂-NO_x, que possui correlação de 0,006, que se aproxima do valor mínimo. Os demais gráficos podem ser vistos nas Figuras 25 a 32, no Apêndice B deste documento.

Figura 13 - Emissões de MP e SO_x versus NO_x para o motor G.



Fonte: o próprio autor.

Figura 14 - Emissões de CO₂ e O₂ versus NO_x para o motor G.



Fonte: o próprio autor.

4.3 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE CONSUMO ESPECÍFICO E RENDIMENTO

Outra análise realizada foi a da relação entre o consumo específico (SFOC) e rendimento. O primeiro passo para este estudo foi o mapeamento de grandezas necessárias para o cálculo do consumo específico, conforme a expressão 6.

$$SFOC = \frac{\text{Consumo de Combustível (kg)}}{\text{Geração (MWh)}} \quad (6)$$

Estes parâmetros foram extraídos dos RDOs, no período de janeiro de 2013 a dezembro de 2017, totalizando 5 anos de operação. Vale ressaltar, que os dados não são os valores acumulados dos meses, mas sim, valores diários do primeiro dia de operação de cada mês. Com estes dados, foi possível construir um gráfico da variação do SFOC ao longo dos anos, bem como sua média, desvio padrão e outros parâmetros. O gráfico pode ser visto na Figura 15.

Em seguida, foi realizada uma análise do rendimento dos motores da usina. Segundo Gomes (2014), o rendimento de um grupo gerador pode ser calculado por:

$$\eta_e = \frac{360000}{SFOC \times PCI} \quad (7)$$

O SFOC é dado em kg/kWh e o PCI, já citado, é o poder calorífico inferior do combustível, dado em kJ/kg, que é um valor tabelado referente ao tipo de combustível utilizado. Segundo Lora e Nascimento (2004), o PCI do combustível OCB1 é de 41,221 kJ/kg.

Portanto, a partir da Equação 6, do valor do PCI do combustível e do gráfico do SFOC, foi possível gerar um gráfico semelhante, ao longo dos 5 anos, para rendimento do grupo gerador, que está apresentado na Figura 16.

A partir dessas séries temporais (SFOC e rendimento), foram analisadas medidas estatísticas, como média, valores máximos, mínimos, desvio padrão e o coeficiente de variação. Estes parâmetros possibilitam mensurar o comportamento das grandezas ao longo da série, como por exemplo, o desvio padrão, que mensura a dispersão dos dados da amostra em relação ao seu valor médio.

Os resultados da análise estatística se encontram na Tabela 7, que possibilitam analisar os baixos valores de desvio padrão e coeficiente de variação das duas grandezas, mostrando que os valores estão concentrados em torno de seu valor médio, ou seja, os dois parâmetros analisados se mantiveram praticamente constantes ao longo do período de análise. Como o rendimento pode ser obtido diretamente a partir do SFOC e são inversamente proporcionais, o nível de correlação entre essas grandezas é de -1, como pode ser observado na tabela (valor aproximado).

Tabela 7 - Análise Estatística - SFOC e Rendimento.

	SFOC	Rendimento
Média	205,12 kg/MWh	42,59 %
Valor máximo	212,48 kg/MWh	44,25 %
Valor mínimo	197,36 kg/MWh	41,10 %
Desvio padrão	3,43 kg/MWh	0,72 %
Coefficiente de Variação	1,67 %	1,69 %
Correlação	-0,9997	

Fonte: o próprio autor.

Para analisar melhor o comportamento do rendimento do grupo gerador, outros dois gráficos foram construídos, mostrando a variação dessa grandeza em função do consumo diário de combustível e da geração diária de energia, que estão mostrados nas Figuras 19 e 20. Também foram calculados os valores do coeficiente de correlação entre esses parâmetros, que se encontram na Tabela 8.

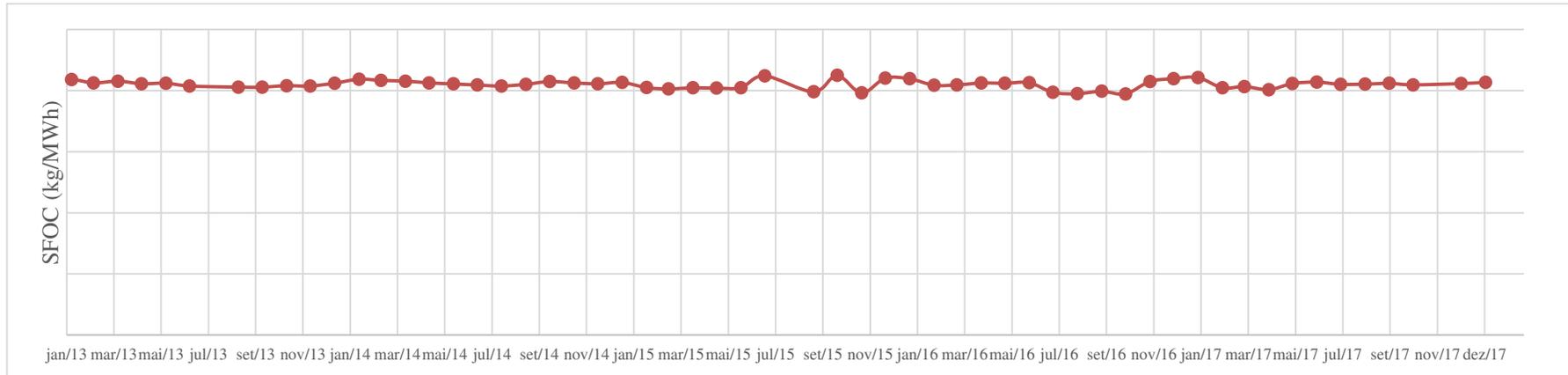
Tabela 8 - Coeficientes de Correlação – Rendimento.

	Coefficiente de Correlação
Rendimento – Consumo de Combustível	0,2486
Rendimento – Geração de Energia	-0,2462

Fonte: o próprio autor.

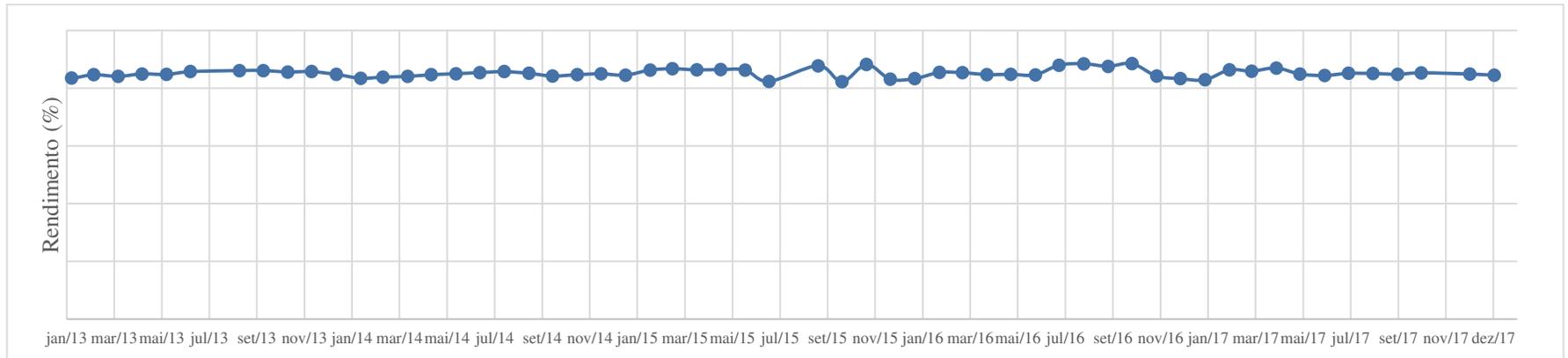
Os baixos valores destes coeficientes de correlação e o comportamento dos gráficos permite concluir que essas grandezas possuem fraca correlação, ou seja, não é possível tirar conclusões sobre o rendimento a partir do consumo de combustível ou da geração de energia, pois estas variáveis não possuem dependência direta.

Figura 15 - Variação do Consumo Específico de Combustível ao longo de 5 anos de operação da usina.

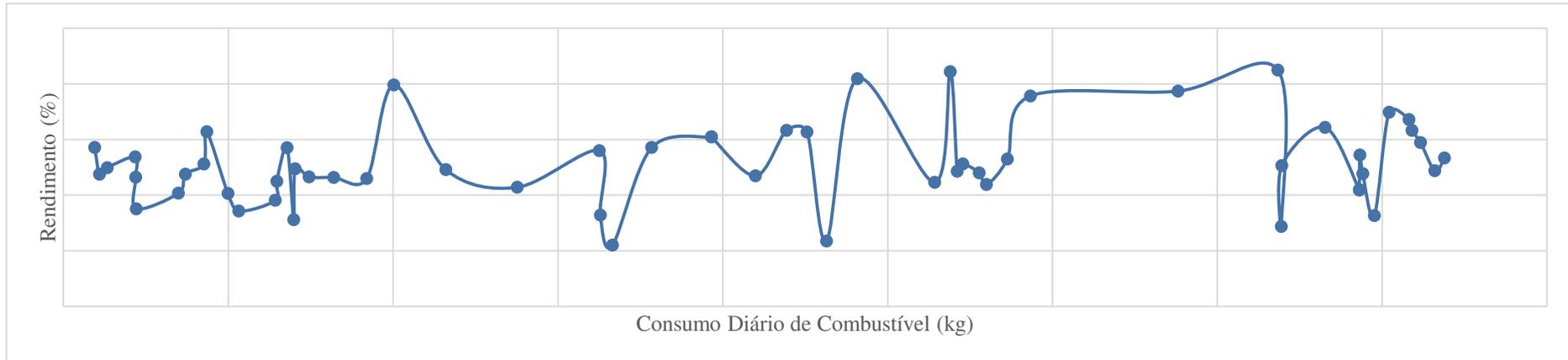


Fonte: o próprio autor.

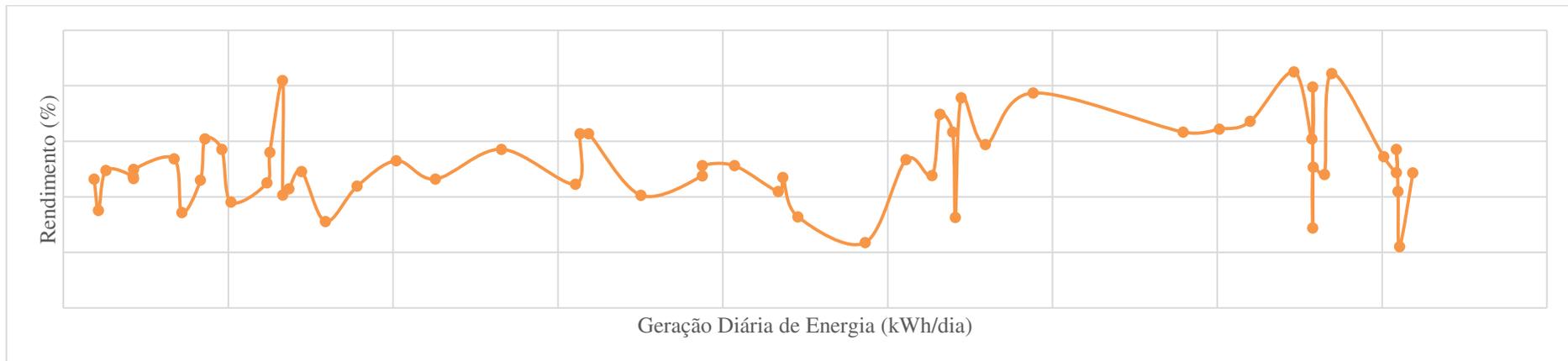
Figura 16 - Variação do Rendimento do Grupo Gerador ao longo de 5 anos de operação da usina.



Fonte: o próprio autor.

Figura 17 - Rendimento *versus* Consumo Diário de Combustível.

Fonte: o próprio autor.

Figura 18 - Rendimento *versus* Geração Diária de Energia.

Fonte: o próprio autor.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas, não foi possível concluir que os coeficientes de correlação seguem um comportamento similar, para todas as métricas e para todos os motores, variando consideravelmente de acordo com o motor analisado. O motivo deste comportamento é justificado fortemente pela escassez de dados, principalmente de emissões atmosféricas, dado que essas foram coletadas uma vez por ano.

Uma possível melhoria, proposta para trabalhos futuros consiste na ampliação da base de dados de emissões atmosféricas. Neste caso, será possível observar com maior precisão o comportamento das grandezas e de suas correlações.

No que diz respeito à análise de consumo específico de combustível e rendimento, vale destacar como essas grandezas se mantiveram praticamente constantes ao longo de todo o período analisado. Porém, ainda assim, a ocorrência de uma pequena variação poderá ser analisada de forma mais aprofundada em trabalhos futuros, como por exemplo, verificar o impacto financeiro e ambiental que essas variações podem causar.

Para o desenvolvimento do trabalho, várias disciplinas da graduação foram essenciais, citando algumas: Probabilidade e Estatística, Operação e Controle de Sistemas Elétricos, Máquinas Elétricas, Geração de Energia Elétrica, Equipamentos Elétricos, Técnicas de Alta Tensão, entre outras.

Vale ressaltar, também, a relevância, para o aluno, da realização de um trabalho de conclusão de curso em uma empresa, com a disponibilidade de dados reais para a condução das análises, fato este que proporciona, uma forte imersão em questões relevantes para o contexto de usinas termoeletricas, tanto no âmbito do desempenho operacional, quanto de desempenho ambiental.

REFERÊNCIAS

ANEEL. *BIG – Banco de Informações de Geração*. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>> Acesso em: 23 jan. 2018.

BORBOREMA ENERGÉTICA. *Página Institucional*. Disponível em <<http://borboremaenergetica.com.br/>> Acesso em: 15 dez. 2017.

COELHO, P. *Usinas Termoelétricas – A Energia da Combustão*, jun. 2015. Disponível em <<http://www.engquimicasantosp.com.br/2015/06/usinas-termoeletricas-energia-combustao.html>>. Acesso em: 02 out. 2017.

COLOSSI, B. R. *Avaliação Ambiental de um Usina Termoelétrica à Óleo Combustível Utilizando Análise do Ciclo de Vida*. 2012. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2012. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/114584/000930736.pdf?sequence=1>>.

CPFL. *Página Institucional*. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/>> Acesso em: 20 nov. 2017.

ELETOBRÁS. *Página Institucional*. Disponível em: <<http://www.eletobras.com>> Acesso em: 15 dez. 2017.

GOMES, A. E. V. *Recuperação da Energia Térmica de Motores de Combustão Interna numa Central Termoelétrica*. Dissertação de Mestrado (Equipamentos e Sistemas Mecânicos) - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, nov. 2014 Disponível em: <http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese_Mest_Andre_Eloi-Gomes.pdf>

IEMA. *Geração Termoelétrica e emissões atmosféricas: poluentes e sistemas de controle*. Instituto de Energia e Meio Ambiente. São Paulo, nov. 2016. Disponível em: <<http://www.energiiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/11/IEMA-EMISSOES.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2017.

JORNAL GRANDE BAHIA. *Página Institucional*. Disponível em: <<http://www.jornalgrandebahia.com.br/2014/>> Acesso em: 07 mar. 2018.

KONDO, N. N. *Determinação de Índices de Desempenho em Usinas Termoelétricas*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2007. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Trabalhos%20 finais/TCC_054_2007.pdf>. LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. *Geração Termoelétrica – Planejamento, Projeto e Execução*. Editora Interciência. 2004.

A modernização das usinas e seus desafios. Gazeta Mercantil, jan. 2009. Disponível em: <http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/modulos/noticia/noticia_0328.html?uri=/index.html> Acesso em: 10 jan. 2018.

MRU. *Página Institucional*. Disponível em: <<http://www.mru-instruments.com/>> Acesso em: 20 jan. 2018.

PRADÈRE, G. L. *Simulação de desempenho de um sistema de pré-aquecimento de motores diesel de uma usina termoelétrica via energia solar*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, mai. 2017. Disponível em: <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/1513235_2017_completo.pdf>.

REIS, L. B. *Geração de Energia Elétrica*. 2. ed. São Paulo, Manole, 2015.

SEMA. *Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Paraná) – Resolução nº 016/2014*. Curitiba, 2014.

STUCCHI, G. A. D.; TACONELLI, M.; LANGHI, V. A. B. *Geração Termelétrica: Principais Componentes e Tipos de Centrais Termelétricas*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2015.

As termoelétricas na geração elétrica no Brasil. Grandes Construções. Disponível em: <http://www.grandesconstrucoes.com.br/br/index.php?option=com_contenido&task=viewMateria&id=343> Acesso em: 20 nov. 2017.

TEVISA. *Página Institucional*. Disponível em: <<http://www.tevisa.com.br/>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

WÄRTSILÄ. *Power Plants Catalogue*. 2012. Disponível em <<http://petrotech.ir/imagesProduct/FileProduct/29.pdf>> Acesso em: 15 dez. 2017.

WÄRTSILÄ. *Sobre a Wärtsilä Brasil*. 2017. Disponível em <<https://www.wartsila.com/bra/sobre>> Acesso em: 15 dez. 2017.

APÊNDICE A – TABELAS DE CORRELAÇÃO

A seguir estão expostas as tabelas dos níveis de correlação dos 8 motores analisados neste trabalho. Da Tabela 11 à 18, estão mostrados os níveis de correlação entre as métricas de desempenho operacionais e ambientais. Da Tabela 19 à 26, estão mostrados os níveis de correlação entre métricas de desempenho ambientais (emissões atmosféricas).

Tabela 9 - Níveis de Correlação – Motor A.

MP - Geração	0,5814	SOx - Geração	0,5485	NOx - Geração	0,7072
MP - Potência	-0,2636	SOx - Potência	0,4039	NOx - Potência	-0,0152
MP - Horímetro	0,1320	SOx - Horímetro	0,1029	NOx - Horímetro	0,3750
MP - Consumo	0,6055	SOx - Consumo	0,5730	NOx - Consumo	0,7315
CO - Geração	-0,1697	CO2 - Geração	0,2814	O2 - Geração	-0,6406
CO - Potência	0,4971	CO2 - Potência	-0,2492	O2 - Potência	0,1276
CO - Horímetro	0,3373	CO2 - Horímetro	0,7663	O2 - Horímetro	-0,6405
CO - Consumo	-0,1820	CO2 - Consumo	0,2751	O2 - Consumo	-0,6595

Fonte: o próprio autor.

Tabela 10 - Níveis de Correlação – Motor B.

MP - Geração	0,3003	SOx - Geração	0,5570	NOx - Geração	0,1509
MP - Potência	0,3858	SOx - Potência	0,6160	NOx - Potência	0,2435
MP - Horímetro	0,0246	SOx - Horímetro	-0,4914	NOx - Horímetro	0,0644
MP - Consumo	0,3817	SOx - Consumo	0,9690	NOx - Consumo	0,4172
CO - Geração	-0,9865	CO2 - Geração	-0,7020	O2 - Geração	0,3018
CO - Potência	-0,9823	CO2 - Potência	-0,7473	O2 - Potência	0,2630
CO - Horímetro	0,4834	CO2 - Horímetro	0,9418	O2 - Horímetro	-0,6855
MP - Geração	0,3003	SOx - Geração	0,5570	NOx - Geração	0,1509

Fonte: o próprio autor.

Tabela 11 - Níveis de Correlação – Motor C.

MP - Geração	0,5301	SOx - Geração	0,4812	NOx - Geração	0,3668
MP - Potência	0,2333	SOx - Potência	-0,1377	NOx - Potência	0,0648
MP - Horímetro	0,1005	SOx - Horímetro	0,0034	NOx - Horímetro	0,2855
MP - Consumo	0,5677	SOx - Consumo	0,5102	NOx - Consumo	0,4072
CO - Geração	-0,8826	CO2 - Geração	-0,5919	O2 - Geração	0,2085
CO - Potência	-0,7102	CO2 - Potência	-0,5073	O2 - Potência	0,5738
CO - Horímetro	0,8383	CO2 - Horímetro	0,3977	O2 - Horímetro	-0,7057
CO - Consumo	-0,8837	CO2 - Consumo	-0,6187	O2 - Consumo	0,1934

Fonte: o próprio autor.

Tabela 12 - Níveis de Correlação – Motor D.

MP - Geração	0,6920	SOx - Geração	0,4639	NOx - Geração	0,6882
MP - Potência	-0,5923	SOx - Potência	-0,3045	NOx - Potência	-0,6413
MP - Horímetro	0,1228	SOx - Horímetro	0,0818	NOx - Horímetro	0,3513
MP - Consumo	0,7188	SOx - Consumo	0,4887	NOx - Consumo	0,7160
CO - Geração	-0,3350	CO2 - Geração	0,1810	O2 - Geração	-0,7054
CO - Potência	0,2727	CO2 - Potência	-0,4575	O2 - Potência	0,6708
CO - Horímetro	0,3134	CO2 - Horímetro	0,7426	O2 - Horímetro	-0,6030
CO - Consumo	-0,3516	CO2 - Consumo	0,1800	O2 - Consumo	-0,7238

Fonte: o próprio autor.

Tabela 13 - Níveis de Correlação – Motor E.

MP - Geração	0,6302	SOx - Geração	0,5742	NOx - Geração	0,6518
MP - Potência	0,4976	SOx - Potência	0,3356	NOx - Potência	0,4478
MP - Horímetro	0,1328	SOx - Horímetro	0,4018	NOx - Horímetro	0,3556
MP - Consumo	0,6234	SOx - Consumo	0,5797	NOx - Consumo	0,6532
CO - Geração	-0,9013	CO2 - Geração	-0,0933	O2 - Geração	-0,5145
CO - Potência	-0,9082	CO2 - Potência	-0,0347	O2 - Potência	-0,6085
CO - Horímetro	-0,9084	CO2 - Horímetro	-0,7130	O2 - Horímetro	0,1526
CO - Consumo	-0,9061	CO2 - Consumo	-0,1135	O2 - Consumo	-0,4952

Fonte: o próprio autor.

Tabela 14 - Níveis de Correlação – Motor F.

MP - Geração	-0,5311	SOx - Geração	0,4624	NOx - Geração	0,0949
MP - Potência	-0,5472	SOx - Potência	0,4927	NOx - Potência	0,0001
MP - Horímetro	-0,0028	SOx - Horímetro	-0,3179	NOx - Horímetro	0,3160
MP - Consumo	-0,5549	SOx - Consumo	0,4520	NOx - Consumo	0,1302
CO - Geração	-0,7883	CO2 - Geração	-0,4566	O2 - Geração	0,4578
CO - Potência	-0,7946	CO2 - Potência	-0,5103	O2 - Potência	0,5078
CO - Horímetro	0,6434	CO2 - Horímetro	0,7507	O2 - Horímetro	-0,3252
CO - Consumo	-0,7832	CO2 - Consumo	-0,4122	O2 - Consumo	0,4475

Fonte: o próprio autor.

Tabela 15 - Níveis de Correlação – Motor G.

MP - Geração	-0,8824	SOx - Geração	0,1017	NOx - Geração	-0,9054
MP - Potência	-0,8915	SOx - Potência	-0,2841	NOx - Potência	-0,8647
MP - Horímetro	0,8294	SOx - Horímetro	0,4151	NOx - Horímetro	0,8512
MP - Consumo	-0,8687	SOx - Consumo	0,1217	NOx - Consumo	-0,8900
CO - Geração	0,5674	CO2 - Geração	-0,3686	O2 - Geração	0,6515
CO - Potência	0,6433	CO2 - Potência	-0,3760	O2 - Potência	0,6405
CO - Horímetro	0,2483	CO2 - Horímetro	-0,4774	O2 - Horímetro	0,1620
CO - Consumo	0,6093	CO2 - Consumo	-0,4144	O2 - Consumo	0,6893

Fonte: o próprio autor.

Tabela 16 - Níveis de Correlação – Motor H.

MP - Geração	0,8465	SOx - Geração	-0,6995	NOx - Geração	0,7572
MP - Potência	0,3146	SOx - Potência	-0,9554	NOx - Potência	0,1793
MP - Horímetro	0,2696	SOx - Horímetro	0,2106	NOx - Horímetro	0,5034
MP - Consumo	0,8610	SOx - Consumo	-0,6750	NOx - Consumo	0,7785
CO - Geração	-0,2978	CO2 - Geração	0,7866	O2 - Geração	-0,9879
CO - Potência	-0,1064	CO2 - Potência	0,9427	O2 - Potência	-0,8562
CO - Horímetro	0,7534	CO2 - Horímetro	0,4110	O2 - Horímetro	-0,2136
CO - Consumo	-0,2906	CO2 - Consumo	0,7744	O2 - Consumo	-0,9823

Fonte: o próprio autor.

Tabela 17 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor A.

MP - SOx	0,7566	SOx - MP	0,7566	NOx - MP	0,9186
MP - NOx	0,9186	SOx - NOx	0,8603	NOx - SOx	0,8603
MP - CO	-0,7251	SOx - CO	-0,3064	NOx - CO	-0,3981
MP - CO2	-0,1283	SOx - CO2	-0,2817	NOx - CO2	0,0995
MP - O2	-0,6557	SOx - O2	-0,5615	NOx - O2	-0,8523
CO - MP	-0,7251	CO2 - MP	-0,1283	O2 - MP	-0,6557
CO - SOx	-0,3064	CO2 - SOx	-0,2817	O2 - SOx	-0,5615
CO - NOx	-0,3981	CO2 - NOx	0,0995	O2 - NOx	-0,8523
CO - CO2	0,5351	CO2 - CO	0,5351	O2 - CO	0,0039
CO - O2	0,0039	CO2 - O2	-0,5920	O2 - CO2	-0,5920

Fonte: o próprio autor.

Tabela 18 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor B.

MP - SOx	0,5114	SOx - MP	0,5114	NOx - MP	0,9841
MP - NOx	0,9841	SOx - NOx	0,5076	NOx - SOx	0,5076
MP - CO	-0,2944	SOx - CO	-0,4610	NOx - CO	-0,1354
MP - CO2	-0,1307	SOx - CO2	-0,5269	NOx - CO2	-0,0393
MP - O2	-0,6941	SOx - O2	-0,0358	NOx - O2	-0,7558
CO - MP	-0,2944	CO2 - MP	-0,1307	O2 - MP	-0,6941
CO - SOx	-0,4610	CO2 - SOx	-0,5269	O2 - SOx	-0,0358
CO - NOx	-0,1354	CO2 - NOx	-0,0393	O2 - NOx	-0,7558
CO - CO2	0,7431	CO2 - CO	0,7431	O2 - CO	-0,3377
CO - O2	-0,3377	CO2 - O2	-0,6211	O2 - CO2	-0,6211

Fonte: o próprio autor.

Tabela 19 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor C.

MP - SOx	0,8626	SOx - MP	0,8626	NOx - MP	0,9797
MP - NOx	0,9797	SOx - NOx	0,8642	NOx - SOx	0,8642
MP - CO	-0,4235	SOx - CO	-0,3725	NOx - CO	-0,2391
MP - CO2	-0,7104	SOx - CO2	-0,5900	NOx - CO2	-0,5987
MP - O2	-0,3311	SOx - O2	-0,4150	NOx - O2	-0,4775
CO - MP	-0,4235	CO2 - MP	-0,7104	O2 - MP	-0,3311
CO - SOx	-0,3725	CO2 - SOx	-0,5900	O2 - SOx	-0,4150
CO - NOx	-0,2391	CO2 - NOx	-0,5987	O2 - NOx	-0,4775
CO - CO2	0,8045	CO2 - CO	0,8045	O2 - CO	-0,5825
CO - O2	-0,5825	CO2 - O2	-0,4053	O2 - CO2	-0,4053

Fonte: o próprio autor.

Tabela 20 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor D.

MP - SOx	0,7566	SOx - MP	0,7566	NOx - MP	0,9186
MP - NOx	0,9186	SOx - NOx	0,8603	NOx - SOx	0,8603
MP - CO	-0,7251	SOx - CO	-0,3064	NOx - CO	-0,3981
MP - CO2	-0,1283	SOx - CO2	-0,2817	NOx - CO2	0,0995
MP - O2	-0,6557	SOx - O2	-0,5615	NOx - O2	-0,8523
CO - MP	-0,7251	CO2 - MP	-0,1283	O2 - MP	-0,6557
CO - SOx	-0,3064	CO2 - SOx	-0,2817	O2 - SOx	-0,5615
CO - NOx	-0,3981	CO2 - NOx	0,0995	O2 - NOx	-0,8523
CO - CO2	0,5351	CO2 - CO	0,5351	O2 - CO	0,0039
CO - O2	0,0039	CO2 - O2	-0,5920	O2 - CO2	-0,5920

Fonte: o próprio autor.

Tabela 21 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor E.

MP - SOx	0,8502	SOx - MP	0,8502	NOx - MP	0,9355
MP - NOx	0,9355	SOx - NOx	0,9797	NOx - SOx	0,9797
MP - CO	-0,2354	SOx - CO	-0,2819	NOx - CO	-0,3202
MP - CO2	0,5275	SOx - CO2	0,0813	NOx - CO2	0,2263
MP - O2	-0,6793	SOx - O2	-0,2028	NOx - O2	-0,3948
CO - MP	-0,2354	CO2 - MP	0,5275	O2 - MP	-0,6793
CO - SOx	-0,2819	CO2 - SOx	0,0813	O2 - SOx	-0,2028
CO - NOx	-0,3202	CO2 - NOx	0,2263	O2 - NOx	-0,3948
CO - CO2	0,4495	CO2 - CO	0,4495	O2 - CO	0,2210
CO - O2	0,2210	CO2 - O2	-0,7679	O2 - CO2	-0,7679

Fonte: o próprio autor.

Tabela 22 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor F.

MP - SOx	-0,7441	SOx - MP	-0,7441	NOx - MP	0,2424
MP - NOx	0,2424	SOx - NOx	-0,3702	NOx - SOx	-0,3702
MP - CO	0,1693	SOx - CO	0,0932	NOx - CO	-0,0245
MP - CO2	0,3048	SOx - CO2	-0,7973	NOx - CO2	0,5413
MP - O2	-0,8275	SOx - O2	0,9498	NOx - O2	-0,5758
CO - MP	0,1693	CO2 - MP	0,3048	O2 - MP	-0,8275
CO - SOx	0,0932	CO2 - SOx	-0,7973	O2 - SOx	0,9498
CO - NOx	-0,0245	CO2 - NOx	0,5413	O2 - NOx	-0,5758
CO - CO2	0,0992	CO2 - CO	0,0992	O2 - CO	-0,0259
CO - O2	-0,0259	CO2 - O2	-0,7559	O2 - CO2	-0,7559

Fonte: o próprio autor.

Tabela 23 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor G.

MP - SOx	0,3738	SOx - MP	0,3738	NOx - MP	0,9960
MP - NOx	0,9960	SOx - NOx	0,3112	NOx - SOx	0,3112
MP - CO	-0,2930	SOx - CO	0,3968	NOx - CO	-0,2811
MP - CO2	0,0065	SOx - CO2	-0,6172	NOx - CO2	0,0062
MP - O2	-0,3391	SOx - O2	0,4815	NOx - O2	-0,3408
CO - MP	-0,2930	CO2 - MP	0,0065	O2 - MP	-0,3391
CO - SOx	0,3968	CO2 - SOx	-0,6172	O2 - SOx	0,4815
CO - NOx	-0,2811	CO2 - NOx	0,0062	O2 - NOx	-0,3408
CO - CO2	-0,9507	CO2 - CO	-0,9507	O2 - CO	0,9868
CO - O2	0,9868	CO2 - O2	-0,9422	O2 - CO2	-0,9422

Fonte: o próprio autor.

Tabela 24 - Níveis de Correlação entre Emissões Atmosféricas – Motor H.

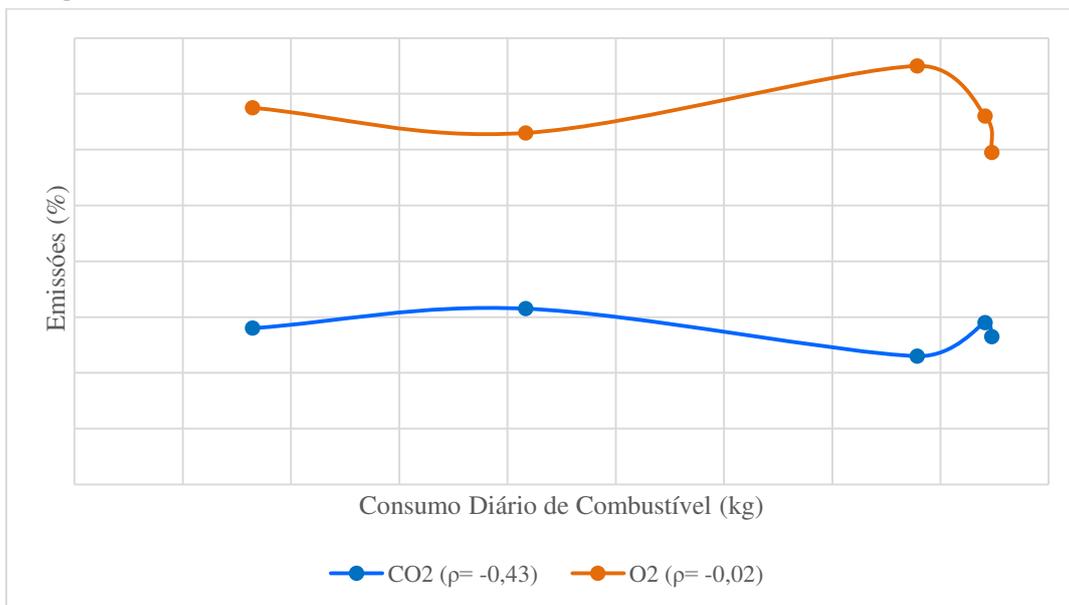
MP - SOx	-0,2722	SOx - MP	-0,2722	NOx - MP	0,9585
MP - NOx	0,9585	SOx - NOx	-0,0683	NOx - SOx	-0,0683
MP - CO	-0,4294	SOx - CO	0,3545	NOx - CO	-0,1860
MP - CO2	0,3618	SOx - CO2	-0,8026	NOx - CO2	0,3174
MP - O2	-0,7597	SOx - O2	0,7997	NOx - O2	-0,6470
CO - MP	-0,4294	CO2 - MP	0,3618	O2 - MP	-0,7597
CO - SOx	0,3545	CO2 - SOx	-0,8026	O2 - SOx	0,7997
CO - NOx	-0,1860	CO2 - Nox	0,3174	O2 - NOx	-0,6470
CO - CO2	0,1657	CO2 - CO	0,1657	O2 - CO	0,2977
CO - O2	0,2977	CO2 - O2	-0,8458	O2 - CO2	-0,8458

Fonte: o próprio autor.

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE VARIAÇÃO DAS EMISSÕES EM FUNÇÃO DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO

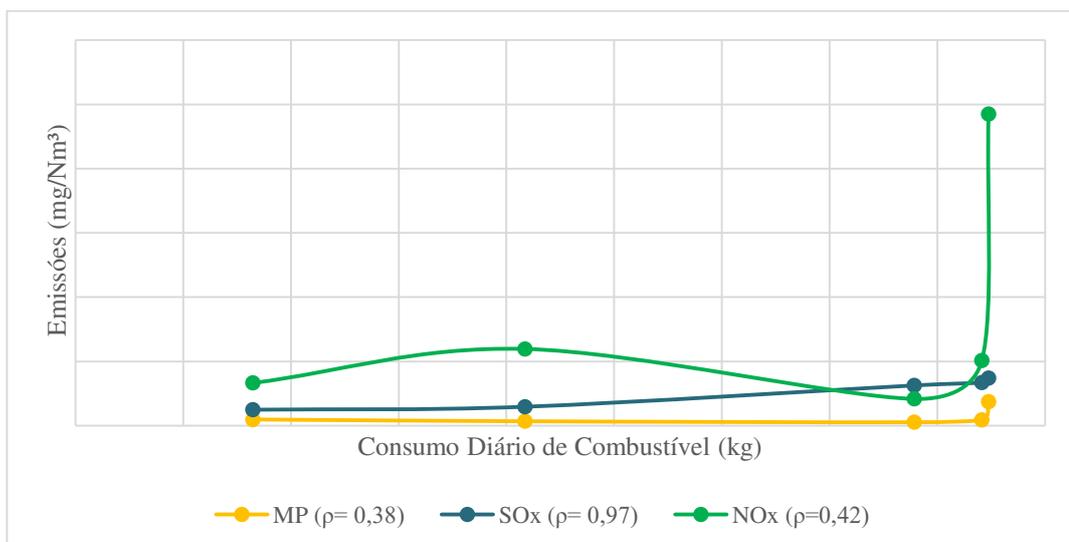
A seguir, estão mostrados gráficos da variação das emissões atmosféricas em função das métricas de desempenho, tanto operacionais quanto ambientais. Vale ressaltar que os níveis das emissões atmosféricas foram ocultados por motivos de confidencialidade das informações.

Figura 19 - Emissões de CO₂ e O₂ *versus* Consumo de Combustível – Motor B.



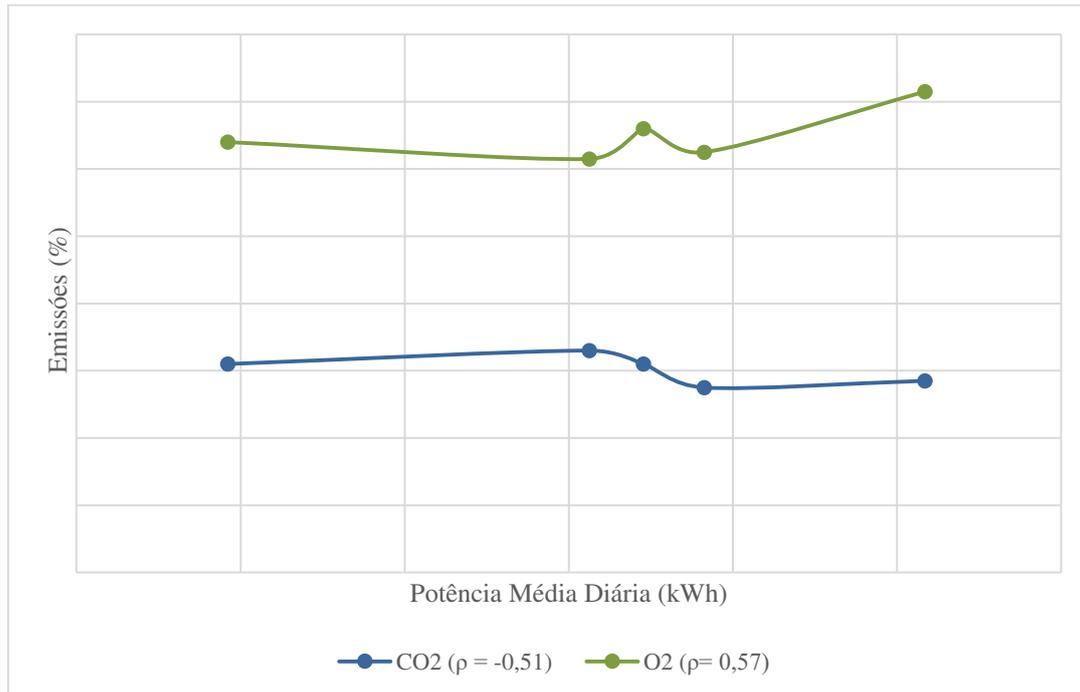
Fonte: o próprio autor.

Figura 20 - Emissões de MP, SO_x e NO_x *versus* Consumo de Combustível – Motor B.



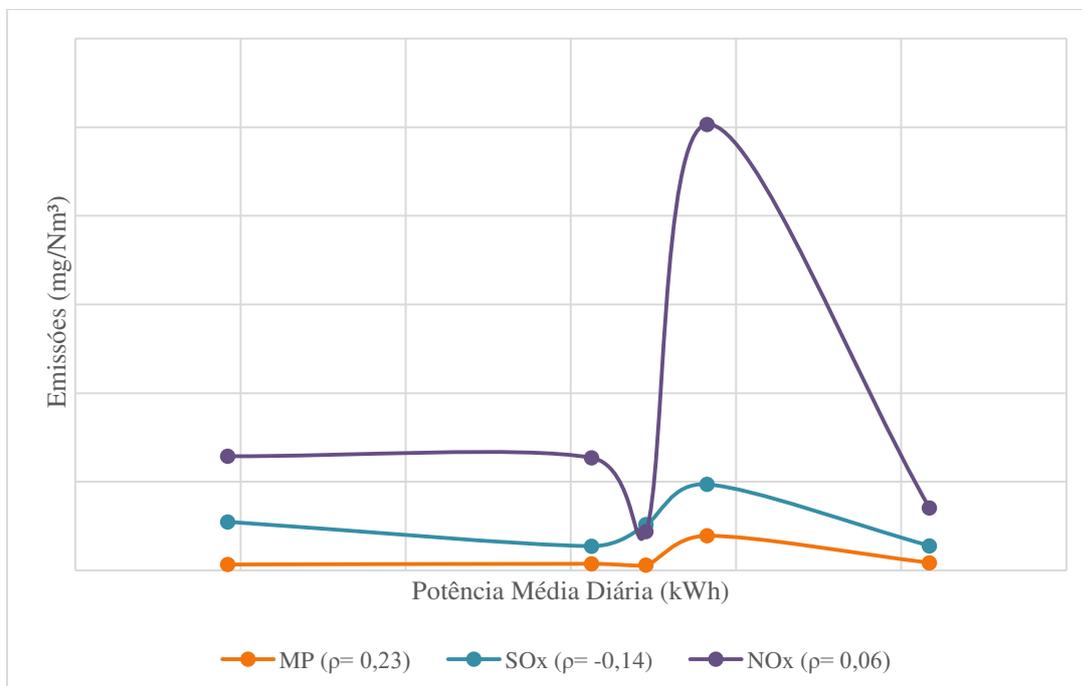
Fonte: o próprio autor.

Figura 21 - Emissões de CO₂ e O₂ versus Potência Média Diária – Motor C.



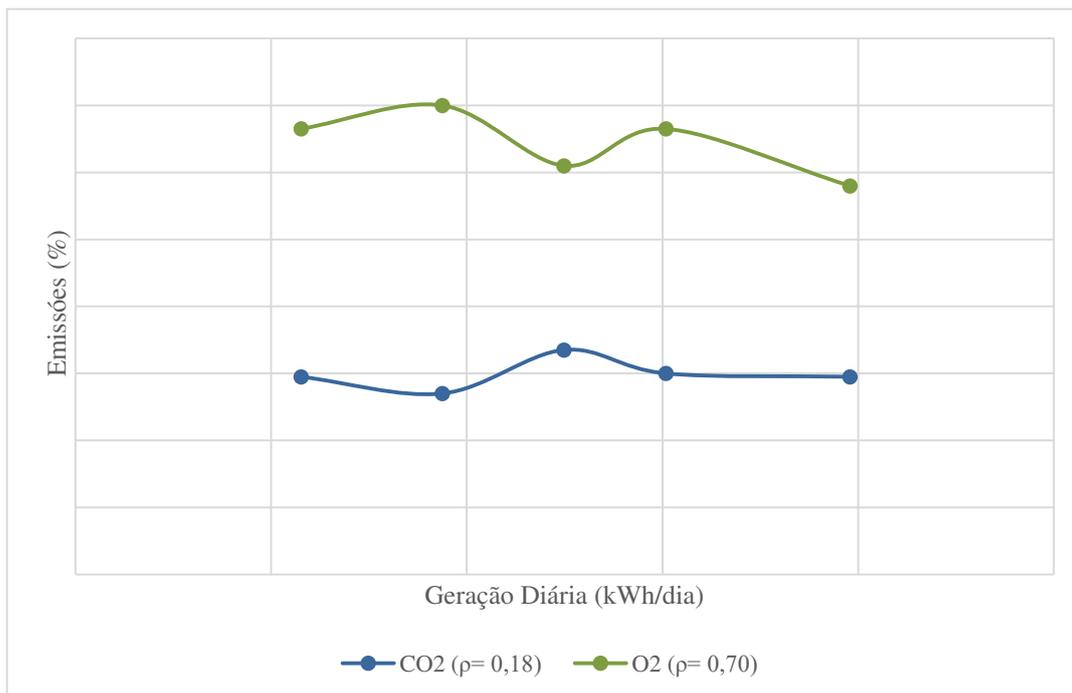
Fonte: o próprio autor.

Figura 22 - Emissões de MP, SO_x e NO_x versus Potência Média Diária – Motor C.



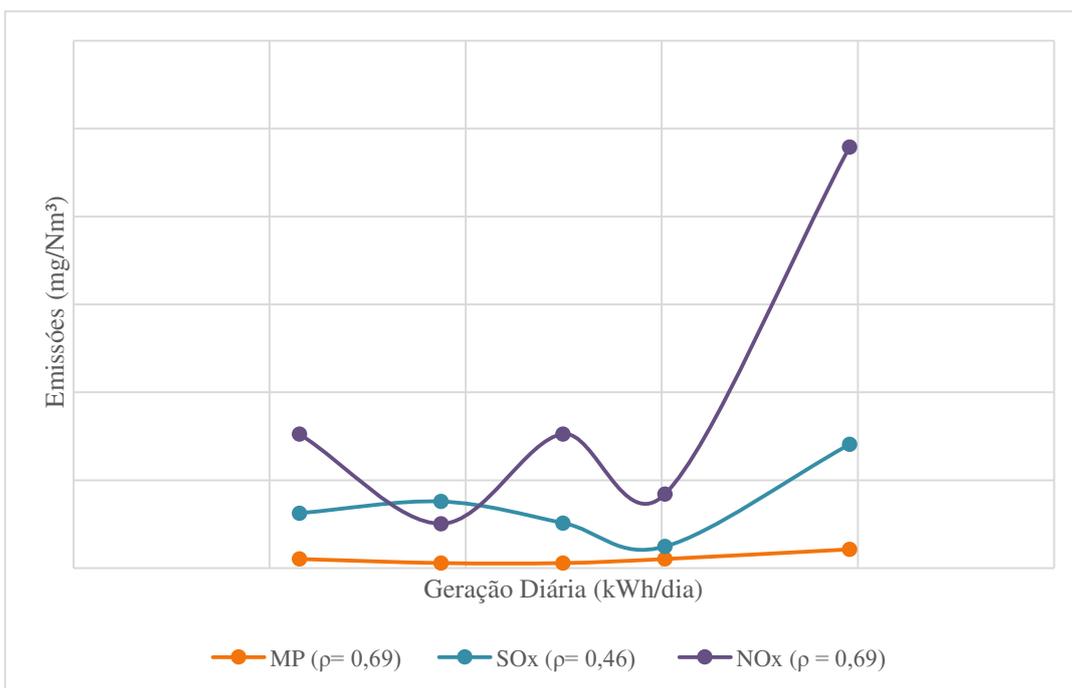
Fonte: o próprio autor.

Figura 23 - Emissões de CO₂ e O₂ versus Geração Diária – Motor D.



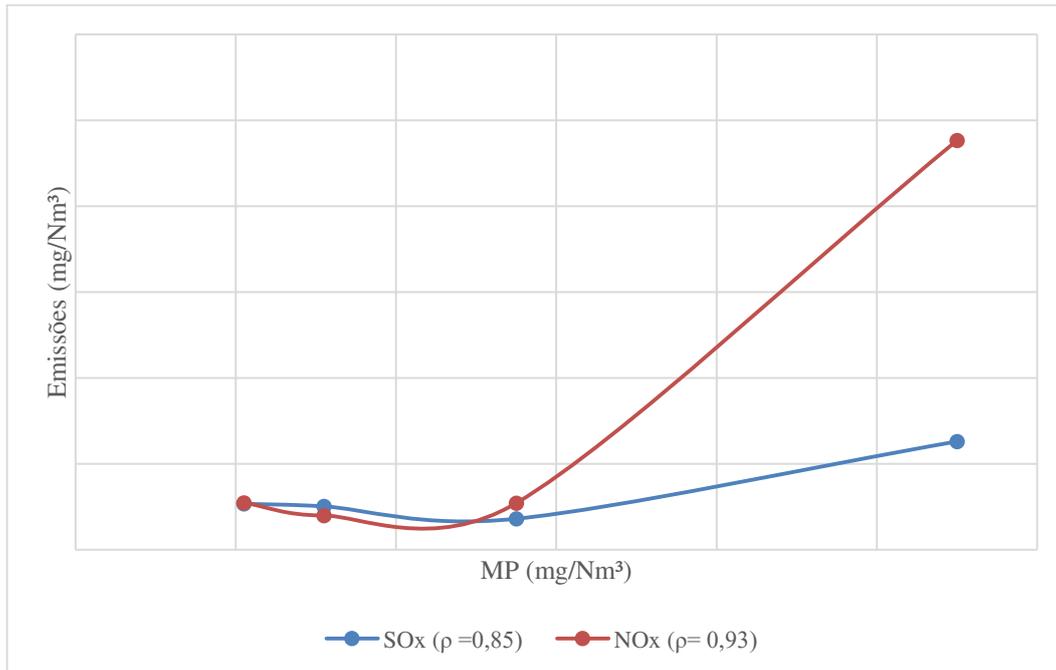
Fonte: o próprio autor.

Figura 24 - Emissões de MP, SO_x e NO_x versus Geração Diária – Motor D.



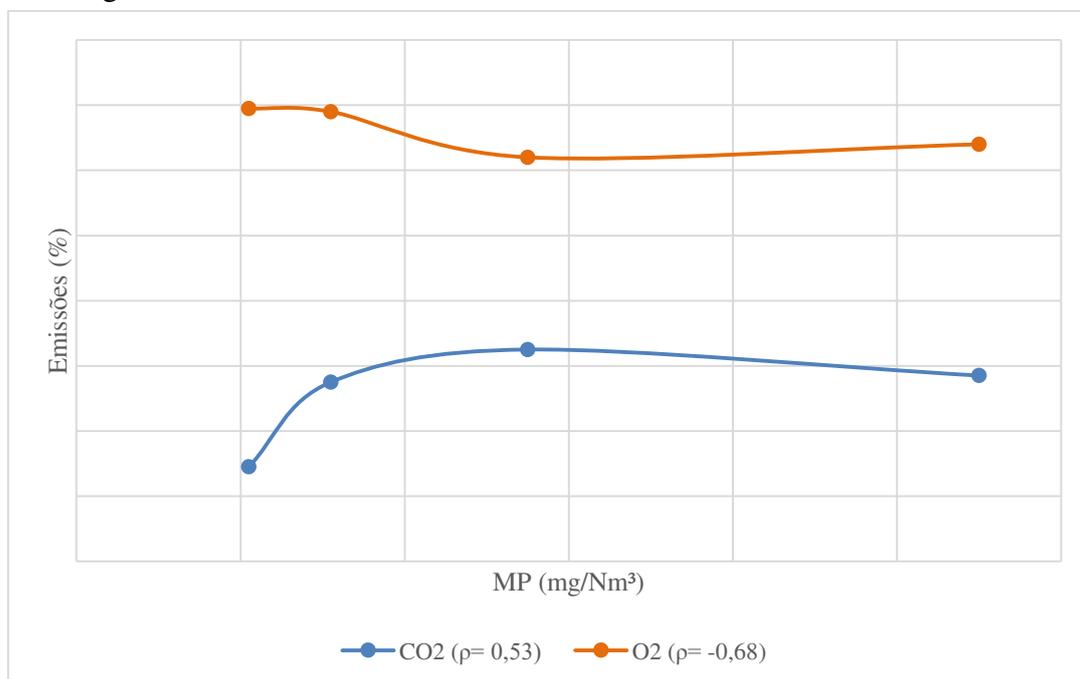
Fonte: o próprio autor.

Figura 25 - Emissões de SO_x e NO_x versus Material Particulado – Motor E.



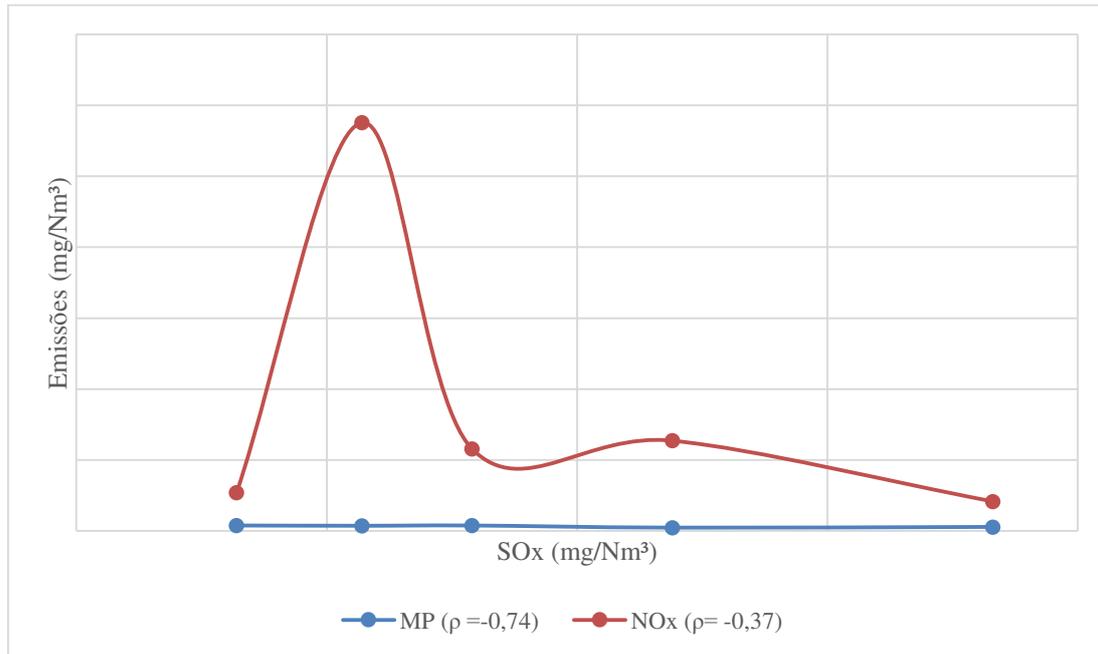
Fonte: o próprio autor.

Figura 26 - Emissões de CO₂ e O₂ versus Material Particulado – Motor E.



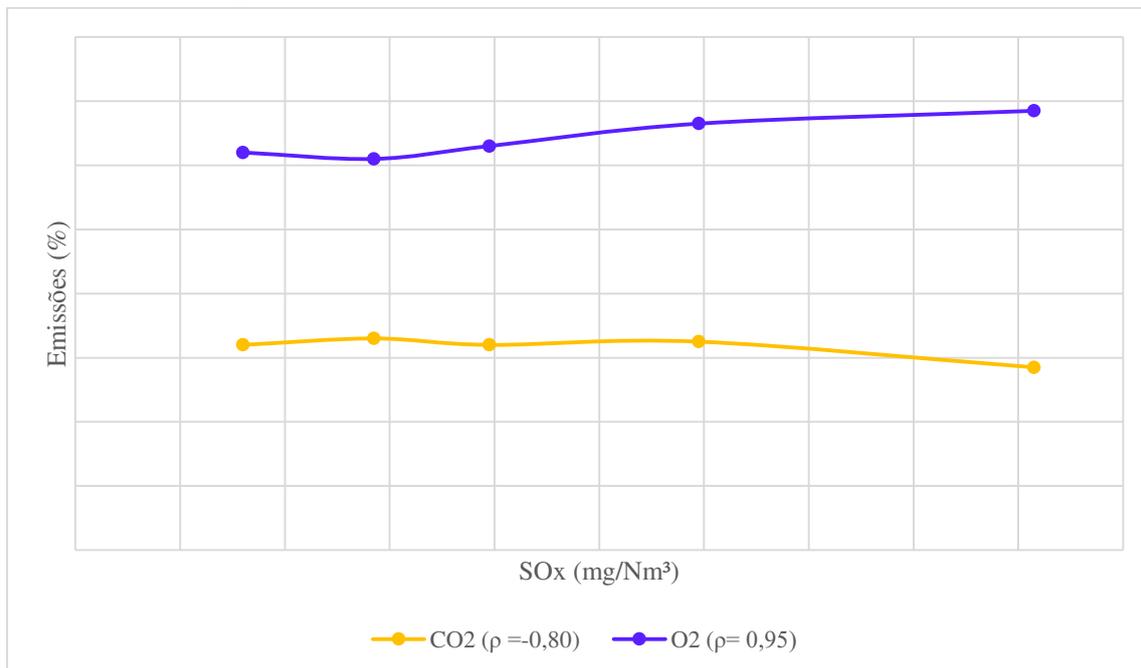
Fonte: o próprio autor.

Figura 27 - Emissões de MP e NO_x versus SO_x – Motor F.



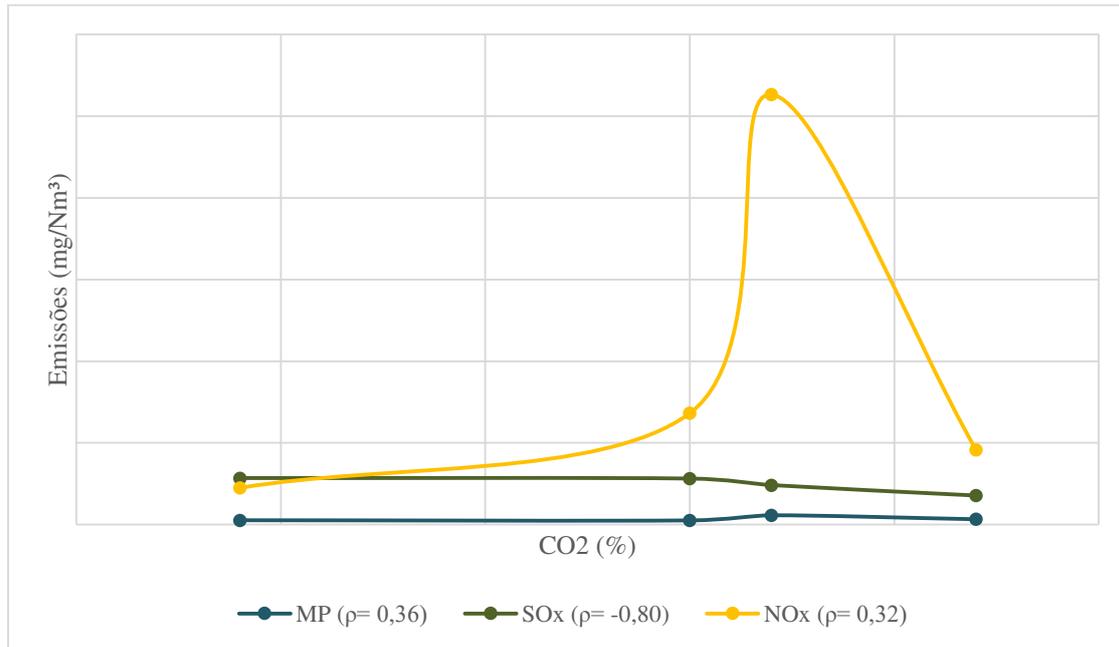
Fonte: o próprio autor.

Figura 28 - Emissões de CO₂ e O₂ versus SO_x – Motor G.



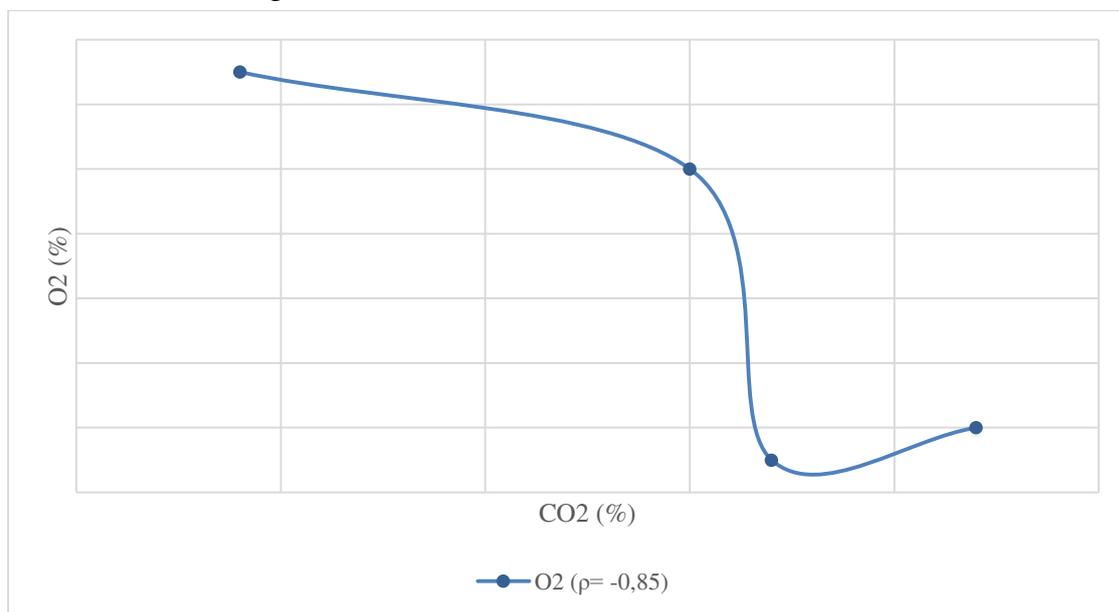
Fonte: o próprio autor.

Figura 29 - Emissões de MP, SO_x e NO_x versus CO₂ – Motor H.



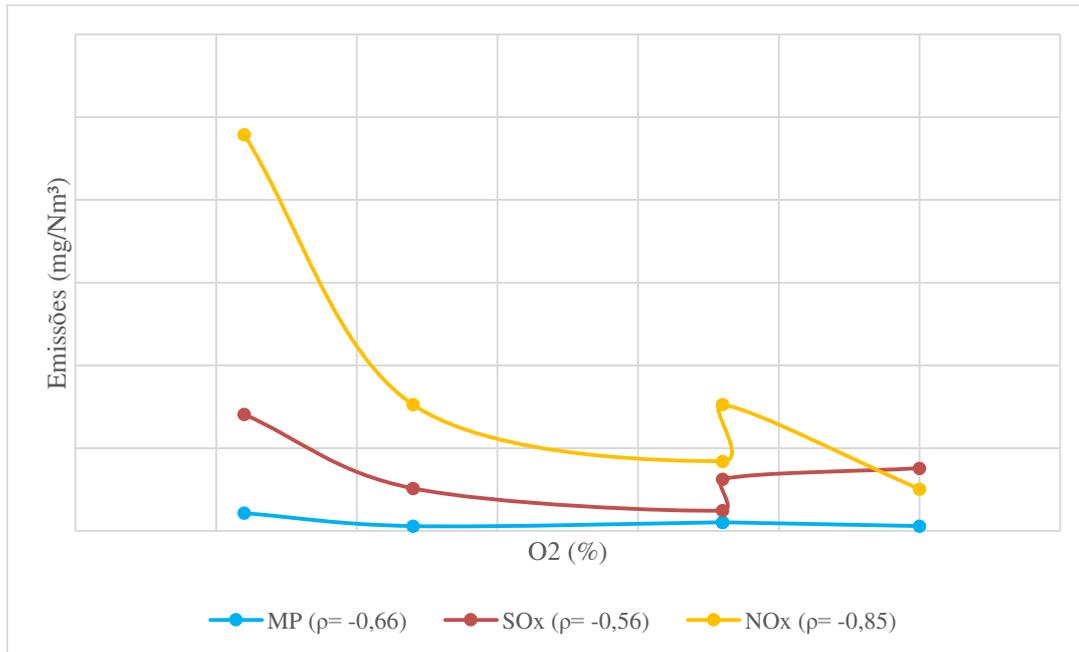
Fonte: o próprio autor.

Figura 30 - Emissões de O₂ versus CO₂ - Motor H.



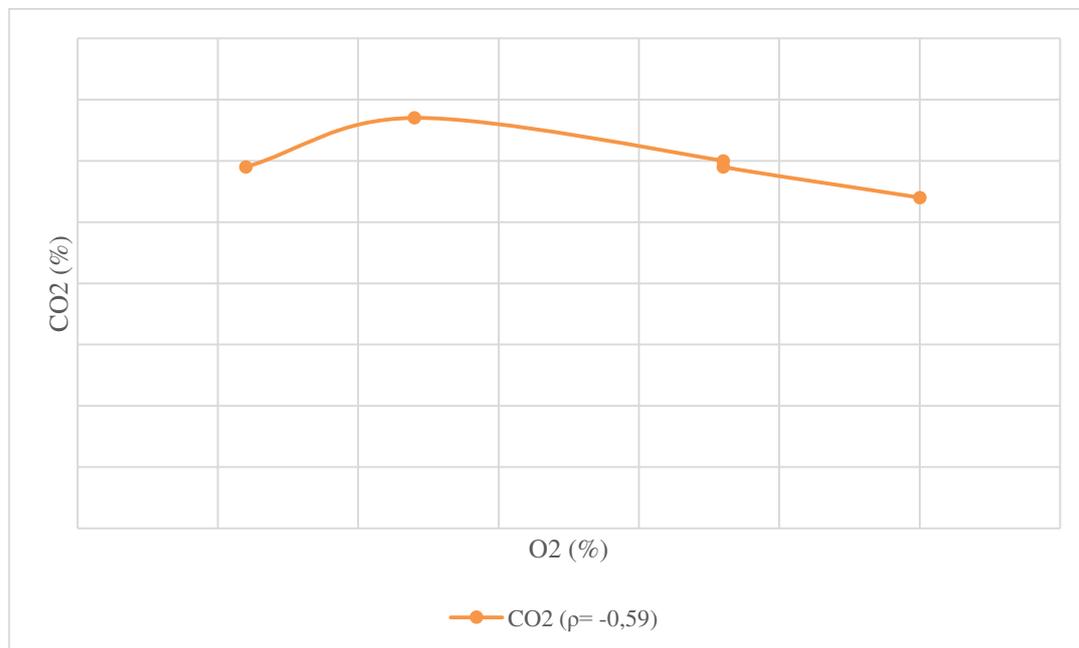
Fonte: o próprio autor.

Figura 31 - Emissões de MP, SO_x e NO_x versus O₂ – Motor A.



Fonte: o próprio autor.

Figura 32 - Emissões de CO₂ versus O₂ – Motor A.



Fonte: o próprio autor.