

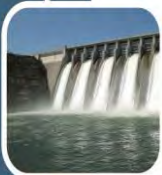
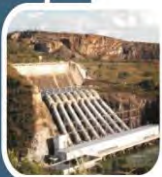


## Estimativa do Potencial de Complementaridade Hidro Eólico Solar para a Matriz Elétrica de Minas Gerais



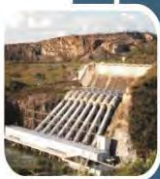
### Relatório 2

Estudo da complementaridade entre os regimes naturais hidro eólico solares no Estado de Minas Gerais e seus possíveis efeitos na estabilização sazonal da oferta de energia no sistema elétrico interligado.

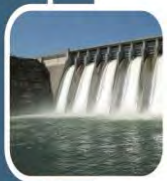
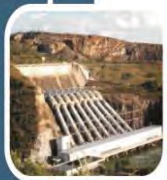




# ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE COMPLEMENTARIDADE HIDRO EÓLICO SOLAR PARA A MATRIZ ELÉTRICA DE MINAS GERAIS



Belo Horizonte  
2016





## FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE

### Governo do Estado de Minas Gerais

Fernando Damata Pimentel – Governador

### Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD

Jairo José Isaac - Secretário

### Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM

Germano Luiz Gomes Vieira – Presidente em exercício

### Diretoria de Instrumentos de Gestão e Planejamento Ambiental - DIPA

Antônio Henrique dos Santos - Diretor

### Pesquisador

Lívia Maria Leite da Silva

### Orientador

Wilson Pereira Barbosa Filho

### Revisão

Abílio César Soares de Azevedo

Elisa Meira Bastos

Wemerson Rocha Ferreira

Wilson Pereira Barbosa Filho

S588m

Silva, Lívia Maria Leite da.

Estimativa do potencial de complementariedade hidro eólica solar para matriz elétrica de Minas Gerais. --- Belo Horizonte: FEAM, 2016.

162 p.; il.

Orientador: Wilson Pereira Barbosa Filho.

1. Fontes energéticas – uso simultâneo. 2. Geração de energia elétrica. 3. Potencial energético . 4. Energia solar. 5. Energia eólica. 6. Energia hidráulica. I. Fundação Estadual do Meio Ambiente. I. Título.

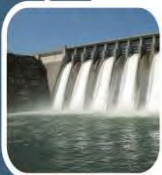
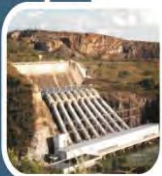
CDU: 620.91





## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo patrocínio e apoio financeiro na realização deste projeto, bem como à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) pelo apoio e suporte técnico e administrativo que propiciaram o desenvolvimento e conclusão efetivos deste relatório.

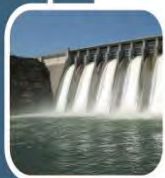
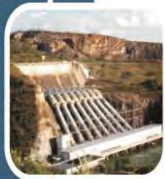




## RESUMO

A utilização simultânea de mais de uma fonte energética caracteriza um mecanismo de aumento da confiabilidade dos sistemas de geração e fornecimento de energia elétrica, dada a diminuição da susceptibilidade destes sistemas a fatores como a variação da disponibilidade sazonal de recursos energéticos. Este tipo de estratégia é particularmente interessante no caso do Brasil e seus estados federativos, uma vez que a matriz energética nacional é fortemente apoiada na hidroeletricidade, uma fonte cuja disponibilidade é sujeita a eventos que possuem caráter estocástico, como o clima e regime de chuvas. Aliado a isso, o cenário energético hoje, busca medidas que contemplem a preocupação com a preservação ambiental, preservação de recursos e redução de emissões, aspectos observados pela geração baseada em fontes renováveis. Desta forma, este estudo realiza uma avaliação do potencial eólico e solares mineiros, em localidades onde já existam usinas hidráulicas em operação, avaliando o potencial de geração de tais regiões mediante a inserção de novas fontes bem como o perfil de geração obtido. Os resultados são concebidos em diferentes cenários de análise e apresentados individualmente para cada usina hidráulica avaliada. São também agrupados e discutidos de acordo com os Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais. De forma geral, pode-se perceber que Minas Gerais possui alta potencialidade para a geração renovável sob o ponto de vista da complementaridade sazonal entre as fontes hidráulica, eólica e solar. Em casos onde não se verificam ganhos relacionados com a estabilização sazonal do suprimento, as vantagens estão ligadas a possibilidade do aumento da energia disponibilizada pelas usinas.









## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Complementaridade: esquema ilustrativo .....	14
Figura 2: Diagrama metodológico .....	18
Figura 3: Composição da matriz energética mineira .....	20
Figura 4: Composição termoeletricidade mineira .....	20
Figura 5: Territórios de desenvolvimento .....	21
Figura 6: Bacias hidrográficas .....	22
Figura 7: Potencial eólico sazonal a 100m de altura .....	23
Figura 8: Radiação solar média diária anual em Minas Gerais .....	24
Figura 9: Diagrama metodológico: Potencial hídrico .....	25
Figura 10: Diagrama metodológico: Potencial solar .....	26
Figura 11: Interface inicial .....	27
Figura 12: Diagrama metodológico: Potencial eólico .....	28
Figura 13: Estações meteorológicas .....	29
Figura 14: Curva de potência do aerogerador utilizado .....	32
Figura 15: Resultados: Usinas analisadas .....	35
Figura 16: Resultados: Complementaridade e repotencialização: UHEs. 35	
Figura 17: Resultados: Complementaridade e repotencialização: PCHs. 36	
Figura 18: Resultados: Territórios de Desenvolvimento e Bacias Hidrográficas .....	40
Figura 19: Usinas analisadas .....	42
Figura 20: Usinas analisadas .....	44
Figura 21: Usinas analisadas .....	45
Figura 22: Usinas analisadas .....	46
Figura 23: Usinas analisadas .....	48
Figura 24: Usinas analisadas .....	50
Figura 25: Usinas analisadas .....	51
Figura 26: Usinas analisadas .....	52
Figura 27: Usinas analisadas .....	53
Figura 28: Usinas analisadas .....	54
Figura 29: Usinas analisadas .....	55

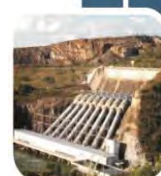




Figura 30: Usinas analisadas.....	56
Figura 31: Usinas analisadas.....	58
Figura 32: Usinas analisadas.....	59
Figura 33: Usinas analisadas.....	60
Figura 34: Usinas analisadas.....	61
Figura 35: Usinas analisadas.....	63
Figura 36: Usinas analisadas.....	65
Figura 37: Usinas analisadas.....	67
Figura 38: Usinas analisadas.....	69
Figura 39: Usinas analisadas.....	71
Figura 40: Usinas analisadas.....	73
Figura 41: Usinas analisadas.....	74
Figura 42: Usinas analisadas.....	75
Figura 43: Usinas analisadas.....	76
Figura 44: Usinas analisadas.....	77
Figura 45: Usinas analisadas.....	78
Figura 46: Usinas analisadas.....	80
Figura 47: Usinas analisadas.....	81
Figura 48: Usinas analisadas.....	83
Figura 49: Usinas analisadas.....	85
Figura 50: Usinas analisadas.....	86
Figura 51: Usinas analisadas.....	88
Figura 52: Cenários de análise .....	89
Figura 53: Usinas analisadas.....	91
Figura 54: Usinas analisadas.....	92
Figura 55: Usinas analisadas.....	93
Figura 56: Usinas analisadas.....	94
Figura 57: Usinas analisadas.....	95
Figura 58: Usinas analisadas.....	96
Figura 59: Usinas analisadas.....	97
Figura 60: Usinas analisadas.....	98
Figura 61: Usinas analisadas.....	99

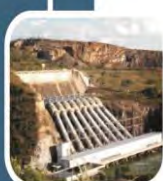


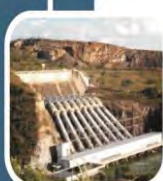


Figura 62: Usinas analisadas.....	100
Figura 63: Usinas analisadas.....	101
Figura 64: Usinas analisadas.....	102
Figura 65: Usinas analisadas.....	103
Figura 66: Usinas analisadas.....	104
Figura 67: Usinas analisadas.....	105
Figura 68: Usinas analisadas.....	106
Figura 69: Usinas analisadas.....	107
Figura 70: Usinas analisadas.....	108
Figura 71: Usinas analisadas.....	109
Figura 72: Usinas analisadas.....	110
Figura 73: Usinas analisadas.....	111
Figura 74: Usinas analisadas.....	112
Figura 75: Usinas analisadas.....	113
Figura 76: Usinas analisadas.....	114
Figura 77: Usinas analisadas.....	115
Figura 78: Usinas analisadas.....	116
Figura 79: Usinas analisadas.....	117
Figura 80: Usinas analisadas.....	118
Figura 81: Usinas analisadas.....	119
Figura 82: Usinas analisadas.....	120
Figura 83: Usinas analisadas.....	121
Figura 84: Usinas analisadas.....	122
Figura 85: Usinas analisadas.....	123
Figura 86: Alto Jequitinhonha .....	126
Figura 87: Caparaó .....	127
Figura 88: Central .....	129
Figura 89: Mata.....	130
Figura 90: Metropolitana .....	131
Figura 91: Mucuri.....	132
Figura 92: Noroeste .....	133
Figura 93: Norte .....	134





Figura 94: Oeste .....	135
Figura 95: Sudoeste.....	136
Figura 96: Sul.....	137
Figura 97: Triângulo Norte .....	138
Figura 98: Triângulo Sul.....	139
Figura 99: Vale do Aço .....	140
Figura 100: Vale do Rio Doce .....	141
Figura 101: Vertentes .....	142
Figura 102: Curva de Aprendizado de módulos fotovoltaicos.....	143
Figura 103: Resultado: Leilões fonte solar.....	144
Figura 104: Resultado: Leilões fonte eólica.....	146
Figura 105: Resultado: Leilões fonte biomassa.....	147
Figura 106: Resultado: Leilões fonte gás natural.....	148
Figura 107: Resultado: Leilões fonte hídrica - PCH.....	149
Figura 108: Resultado: Leilão fonte hídrica - UHE.....	150





## LISTA DE TABELAS

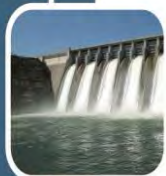
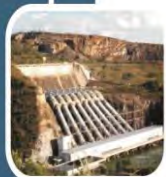
Tabela 1: Coeficientes de rugosidade.....	30
Tabela 2: Caracterização das usinas com complementaridade da geração. .....	37
Tabela 3: Energia híbrida gerada (% energia hidráulica gerada).....	125
Tabela 4: Fator de capacidade das usinas. ....	155
Tabela 5: Fator de capacidade das usinas. ....	155
Tabela 6: Fator de capacidade das usinas. ....	156
Tabela 7: Fator de capacidade das usinas. ....	156
Tabela 8: Fator de capacidade das usinas. ....	157
Tabela 9: Fator de capacidade das usinas. ....	158
Tabela 10: Fator de capacidade das usinas. ....	158
Tabela 11: Fator de capacidade das usinas. ....	159
Tabela 12: Fator de capacidade das usinas. ....	159
Tabela 13: Fator de capacidade das usinas. ....	159
Tabela 14: Fator de capacidade das usinas. ....	160
Tabela 15: Fator de capacidade das usinas. ....	160
Tabela 16: Fator de capacidade das usinas. ....	161
Tabela 17: Fator de capacidade das usinas. ....	161
Tabela 18: Fator de capacidade das usinas. ....	162
Tabela 19: Fator de capacidade das usinas. ....	162





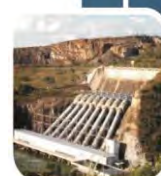
## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	15
2.1. OBJETIVO GERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
3. METODOLOGIA .....	16
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	19
3.2. CÁLCULO DO POTENCIAL HÍDRICO SAZONAL .....	25
3.3. CÁLCULO DO POTENCIAL SOLAR SAZONAL .....	26
3.4. CÁLCULO DO POTENCIAL EÓLICO SAZONAL.....	27
3.5. CÁLCULO DO POTENCIAL HÍBRIDO .....	33
4. POTENCIAL DE COMPLEMENTARIDADE HIDRO-EÓLICA-SOLAR: RESULTADOS .....	34
4.1. RESULTADOS: TERRITÓRIOS DE DESENVOLVIMENTO E BACIAS HIROGRÁFICAS.....	39
4.1.1. Alto Jequitinhonha .....	41
4.1.2. Caparaó .....	43
4.1.3. Central .....	47
4.1.4. Mata .....	49
4.1.5. Metropolitana .....	57
4.1.6. Mucuri .....	62
4.1.7. Noroeste .....	63
4.1.8. Norte .....	65
4.1.9. Oeste .....	68
4.1.10. Sudoeste.....	70



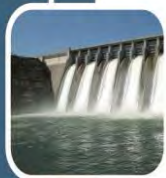
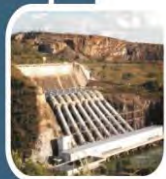


4.1.11. Sul.....	72
4.1.12. Triângulo Norte .....	75
4.1.13. Triângulo Sul .....	79
4.1.14. Vale do Aço.....	82
4.1.15. Vale do Rio Doce .....	84
4.1.16. Vertentes.....	86
4.2. RESULTADOS: ANÁLISE ENTRE CENÁRIOS PROSPECTIVOS	
89	
4.2.1. Alto Jequitinhonha .....	90
4.2.2. Caparaó .....	92
4.2.3. Central .....	95
4.2.4. Mata .....	96
4.2.5. Metropolitana .....	103
4.2.6. Mucuri .....	107
4.2.7. Noroeste .....	108
4.2.8. Norte .....	109
4.2.9. Oeste .....	110
4.2.10. Sudoeste.....	111
4.2.11. Sul.....	112
4.2.12. Triângulo Norte .....	115
4.2.13. Triângulo Sul .....	118
4.2.14. Vale do Aço.....	120
4.2.15. Vale do Rio Doce .....	121
4.2.16. Vertentes.....	123
5. ANÁLISE TERRITORIAL .....	124
6. ANÁLISE ECONÔMICA.....	143

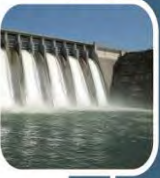
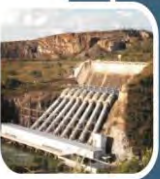




7. CONCLUSÃO .....	152
BIBLIOGRAFIA.....	153
APÊNDICE.....	155
Fator de capacidade das usinas.....	155









## 1. INTRODUÇÃO

O cenário energético brasileiro sempre contou com a forte participação da geração hidráulica no atendimento às demandas por eletricidade. O Brasil possui um vasto potencial hidrelétrico, uma vez que seu território é cortado por grande quantidade de rios e corpos hídricos. Além disso, esta fonte primária de energia possui menor potencial poluidor quando comparada as fontes fósseis, além de ser uma fonte energeticamente “densa”, ou seja, capaz de gerar grandes quantidades de energia por meio da acumulação de grandes volumes de água. A inserção de estruturas de regularização de vazão - os reservatórios - é capaz de garantir a estabilização da geração, diminuindo suas flutuações anuais. Contudo, apesar da *expertise* brasileira, no que se diz respeito ao aproveitamento desta fonte, algumas dificuldades vêm sendo enfrentadas pelo setor elétrico. A construção de grandes reservatórios tem sido dificultada tanto por restrições físicas quanto ambientais, devido ao desenvolvimento de uma legislação ambiental cada vez mais exigente (BARBOSA FILHO; AZEVEDO; XAVIER, 2013). Desta forma, a capacidade de regularização de vazões torna-se menor, e nos últimos anos, tem sido agravado pela escassez de chuvas verificada, sobretudo, na região sudeste do Brasil, onde se localizam grandes usinas geradoras e grandes centros consumidores. Verifica-se, portanto, a necessidade de inserção de mecanismos que possam garantir não somente o aumento da oferta de energia elétrica, dadas as taxas crescentes de consumo em todos os setores da sociedade, mas a sua estabilidade e qualidade ao longo do tempo. Neste sentido, a possibilidade da complementaridade da geração por meio da inserção de fontes renováveis, representadas pelas fontes eólica e solar, torna-se uma alternativa pertinente. Este tipo de iniciativa vai ao encontro das necessidades da sociedade, dado o consumo crescente de eletricidade que vem sendo verificado e a necessidade de implantação de mecanismos de diminuição de emissão de gases de efeito estufa, principalmente pelas atividades relacionadas à geração. Tais necessidades são ainda ratificadas por legislações específicas vigentes, como a Lei Federal nº 9.478/1997 que institui a Política Energética Nacional e prevê o incentivo a



pesquisa e desenvolvimento relacionados à energia renovável. Dadas às características do sistema interligado nacional (SIN), a situação exposta anteriormente a nível nacional, também pode ser interpretada em termos estaduais, como no caso de Minas Gerais, que já verificou a necessidade da introdução das fontes renováveis por meio do Decreto Estadual nº 46296/2013 que dispõe sobre o Programa Mineiro de Energia Renovável - Energias de Minas (PMER) - e medidas para incentivo à produção e uso de energia renovável. O Brasil, bem como Minas Gerais, conta com expressivo potencial de energias renováveis. No caso das fontes eólica e solar, o Estado conta com potenciais significativos, com altos índices de radiação solar incidente, em média superiores a 5,5 kWh/m<sup>2</sup>.dia e com ocorrência de ventos com velocidades superiores a 5 m/s (AMARANTE; ZACK, 2001) (CEMIG, 2012a). A disponibilidade das fontes renováveis, de um modo geral, está atrelada a fatores naturais, como o clima e o movimento solar, e, portanto, apresenta variações ao longo do tempo. Consequências advindas de tal característica estão relacionadas com a necessidade de armazenamento da energia gerada por tais fontes ou a sua hibridização, ou seja, a composição de sistemas apoiados em mais de um tipo de fonte com características de disponibilidades que sigam padrões mais ou menos opostos, caracterizando um regime de geração complementar. Com relação à fonte eólica, verifica-se que os meses com maior disponibilidade de ventos são os mesmos que caracterizam o período seco do ano (julho-agosto-setembro), o que leva a inferir o potencial estratégico da complementaridade entre as fontes hidráulica e eólica. A fonte solar, conta com disponibilidade significativa ao longo do ano, sem grandes oscilações, o que, por sua vez, pode cumprir um papel importante ligado ao aumento da potência elétrica gerada (BARBOSA FILHO; AZEVEDO; XAVIER, 2013). Desta forma, contemplando características particulares de cada fonte energética, a complementaridade da geração por meio da inserção de fontes renováveis busca, principalmente, a estabilização da oferta de energia anual, diminuindo as flutuações sazonais de amplitude significativa, ocasionadas pelo caráter estocástico dos regimes hidrológicos. A Figura 1 ilustra o conceito de complementaridade da geração adotado por esta pesquisa e sua finalidade.



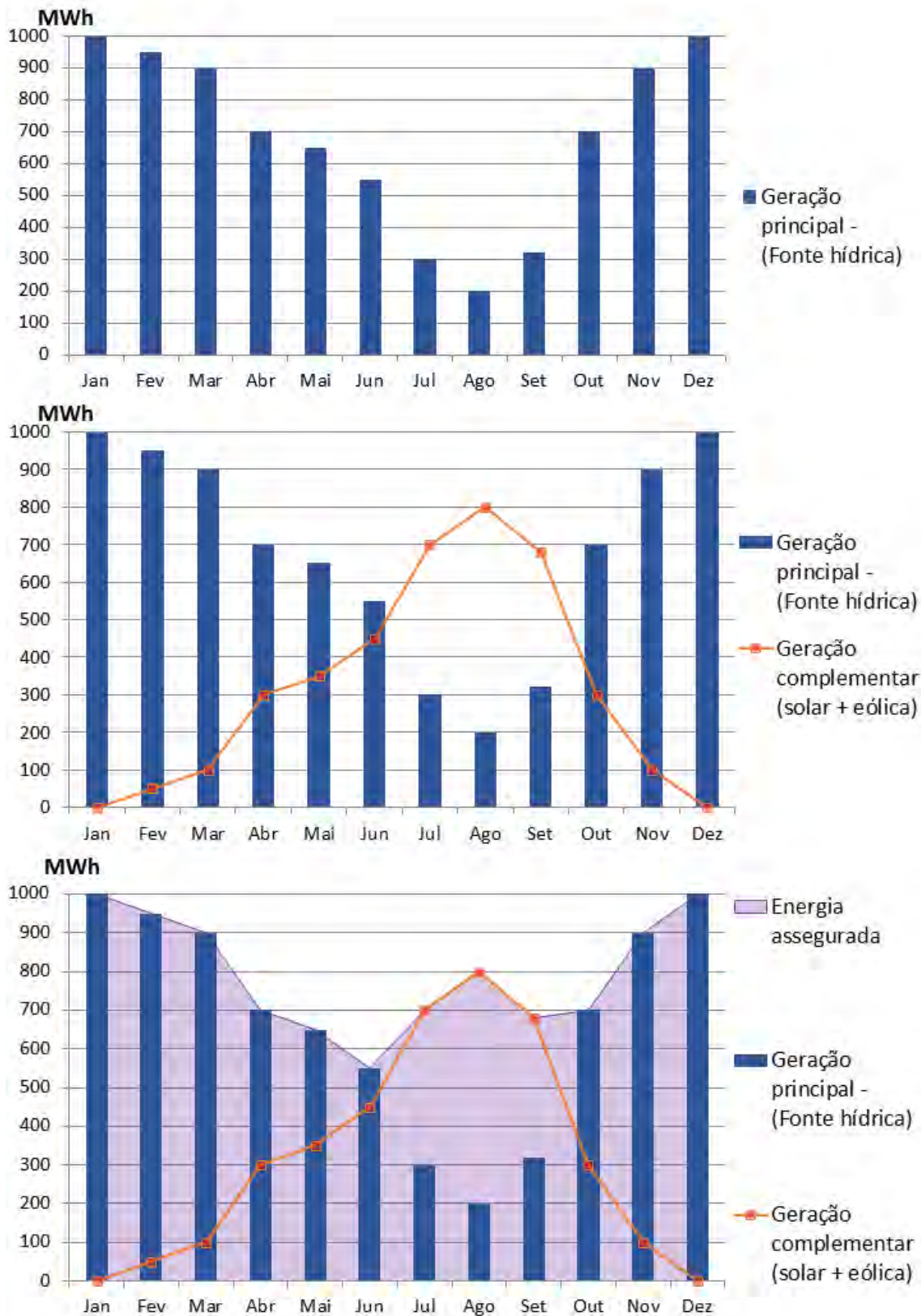


Figura 1: Complementaridade: esquema ilustrativo

Fonte: Elaborado pelos autores.



Dada uma fonte principal que apresenta oscilações em sua disponibilidade mensal, no caso a hidráulica, a inserção de uma nova fonte cujo comportamento é inverso ao da fonte principal, a energia total gerada, ou energia assegurada, é alterada, de modo que as diferenças entre os máximos e mínimos gerados ao longo do ano são diminuídas.

Desta forma, o presente trabalho busca levantar o potencial de complementaridade hidráulico, eólico e solar que existe em localizações onde já existem usinas baseadas em hidroeletricidade em operação dentro do território mineiro. Para tanto, foram levantadas as usinas hidráulicas em operação em Minas Gerais e suas séries históricas de geração de energia. Para determinação do potencial de complementaridade, foram dimensionadas usinas eólicas e solares fotovoltaicas por meio do levantamento das velocidades de ventos e radiação solar disponíveis nas localidades onde se encontram as usinas hidráulicas em operação. Considerou-se que as usinas solares e eólicas possuem a mesma potência instalada das usinas hidráulicas, o que caracteriza o cenário 2 aqui denominado 100%. Os resultados provenientes do cenário 1 denominado 50% e apresentados pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (2014) são aqui comparados ao cenário 100%.

A presente pesquisa possui um caráter amplo, dada a abrangência de todo o território mineiro, e busca nortear a tomada de decisões em projetos de geração de energia baseada em fontes renováveis, seja por agentes públicos ou privados. Ressalta-se que a instalação de um empreendimento requer a realização de medições específicas, de velocidades de vento e de radiação solar.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Identificar as usinas mineiras baseadas em hidroeletricidade (PCHs e UHEs) cujos potenciais eólico e solar das localidades onde estas se encontram, permitam a instalação de usinas solares e eólicas visando a estabilização sazonal da oferta de energia elétrica.



## 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar um levantamento das usinas hidráulicas em operação no Estado de Minas Gerais e suas séries históricas de geração;
- Determinar o potencial para a geração eólica de cada usina hidráulica analisada conforme metodologia específica a ser apresentada;
- Determinar o potencial para a geração solar de cada usina hidráulica analisada conforme metodologia específica a ser apresentada;
- Determinar o potencial para a geração híbrida (eólica + solar + hídrica) de cada usina hidráulica analisada conforme metodologia específica a ser apresentada;
- Analisar os custos atuais relacionados as principais fontes energéticas utilizadas nacionalmente, discutindo as características de cada uma delas.

## 3. METODOLOGIA

Este estudo iniciou-se com o cálculo dos potenciais das fontes envolvidas, que foram determinados mediante metodologias específicas.

Para cálculo das gerações solar fotovoltaica e eólica, adotou-se a premissa, para a complementaridade ou repotencialização, de que a potência destas usinas corresponderia a 100% da potência da hidroelétrica analisada. Desta forma, o dimensionamento de cada usina solar e eólica foi realizado considerando que sua potência instalada seria equivalente a potência da usina hidráulica analisada, o que é aqui denominado cenário 100%.

Inicialmente, são apresentadas características gerais da área de interesse, no caso, Minas Gerais, seus 17 territórios de desenvolvimento e principais bacias hidrográficas. Tais unidades territoriais servem de base para o levantamento e apresentação dos resultados e análise de potenciais energéticos disponíveis.

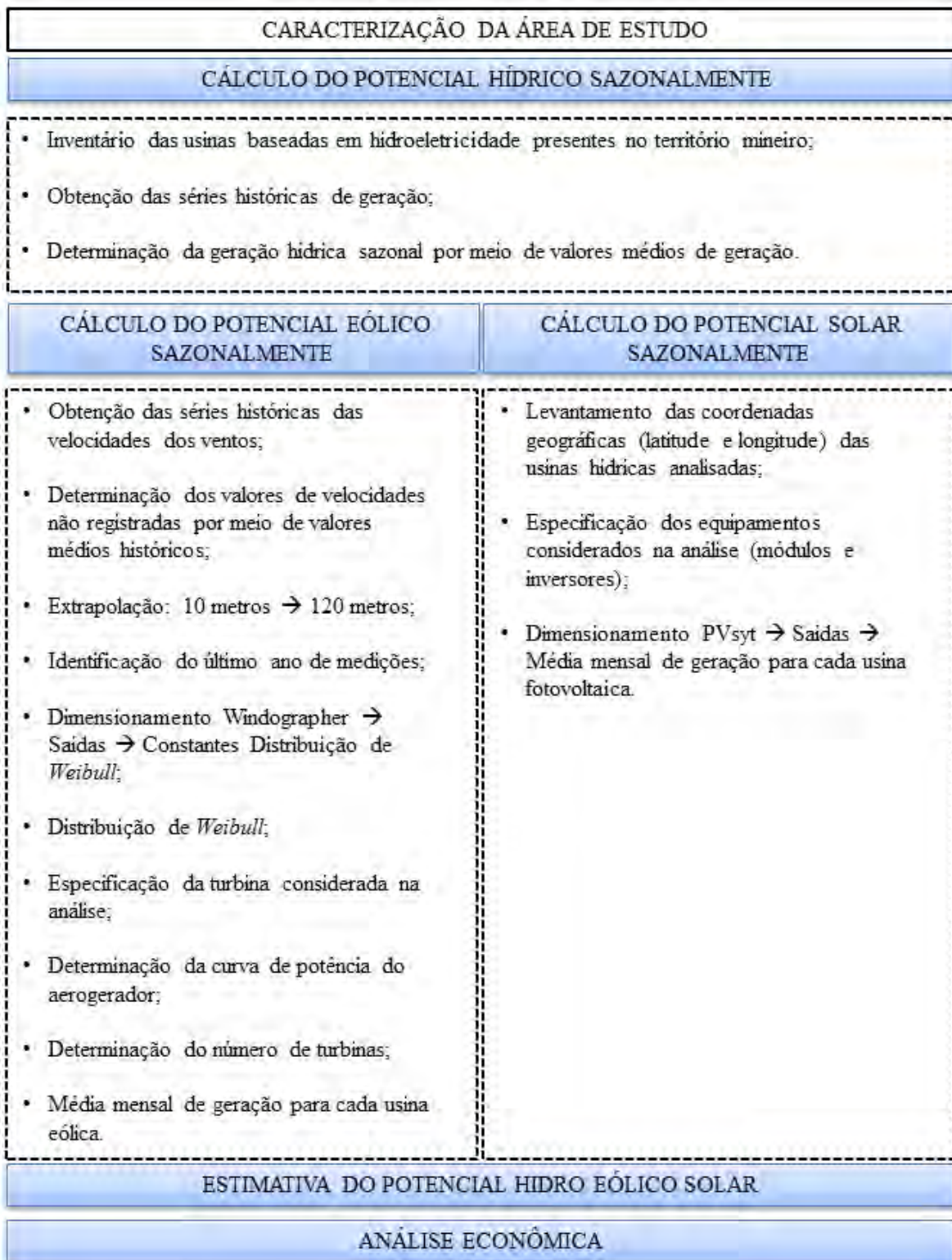


O cálculo do potencial hídrico iniciou-se com o levantamento das usinas baseadas em hidroeletricidade presentes em Minas Gerais. De posse de tais usinas, realizou-se o levantamento de suas séries históricas de geração, mediante contato com proprietários e dados disponibilizados pela CEMIG, ONS e ANEEL. Considerou-se o potencial hídrico sazonal como sendo a média mensal da geração histórica levantada.

O cálculo do potencial eólico foi realizado por meio da obtenção das séries históricas de medição registradas pelas estações telemétricas do INMET. O dimensionamento de cada usina eólica foi realizado por meio dos dados de velocidade de ventos relacionados à estação telemétrica mais próxima da usina hidráulica em avaliação.

O cálculo do potencial solar foi realizado levando-se em conta dados de radiação solar disponível. A metodologia utilizada neste estudo possui as etapas gerais descritas pela Figura 2.





**Figura 2: Diagrama metodológico**

Fonte: Dados da pesquisa.

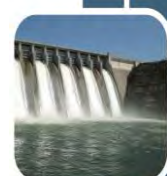
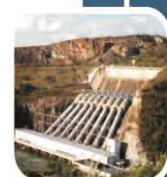


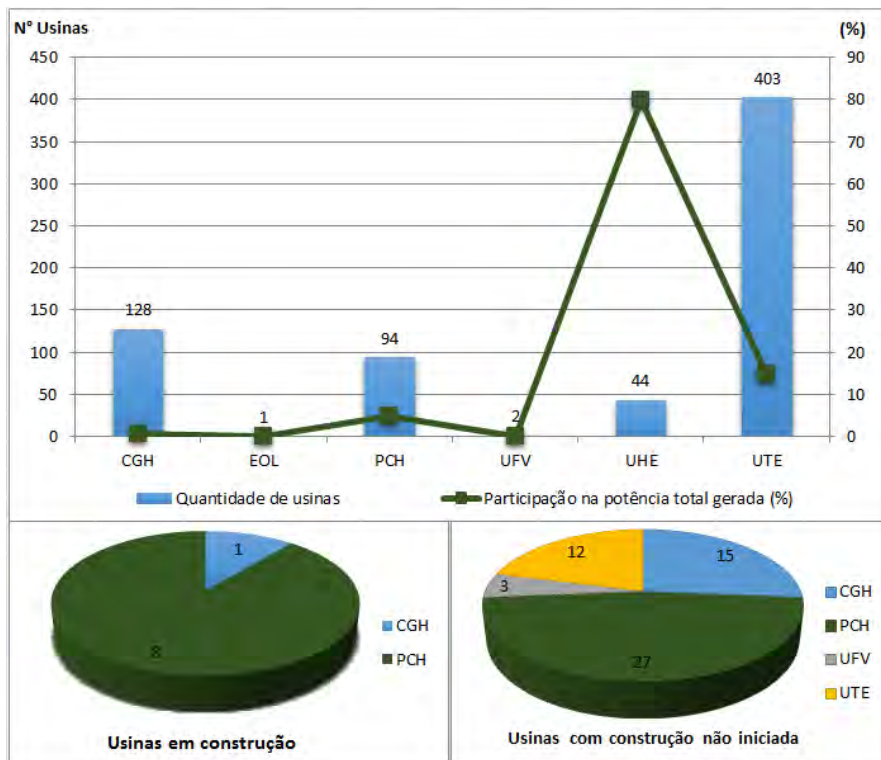
### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Minas Gerais localiza-se na região sudeste do Brasil, possui 853 municípios, uma população de 19.597.330 habitantes e uma superfície de 586.852,35 km<sup>2</sup>. Faz divisa com os estados de Goiás, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul e Bahia. Apresenta clima tropical com subdivisões regionais, sobretudo em função da altitude, e variações entre: tropical de altitude, tropical úmido etc, além do clima semiárido que ocorre no extremo norte mineiro, em função da baixa pluviosidade. A cobertura vegetal de Minas Gerais pode ser resumida em quatro tipos (biomas) principais: Cerrado, que aparece em 50% do estado especialmente nas bacias dos rios São Francisco e Jequitinhonha; Mata Atlântica, com elevado índice pluviométrico; Campos de Altitude ou Rupestres, encontrado nos pontos mais elevados das serras da Mantiqueira, Espinhaço e Canastra; e Mata Seca que aparece no Norte do Estado, no vale do rio São Francisco. Diversos fatores, entre eles, o clima, o relevo e as bacias hidrográficas, são predominantes na constituição da variada vegetação regional (PORTAL DO GOVERNO DE MINAS GERAIS, 2015).

Minas Gerais possui o território inteiramente formado por planaltos, com destaque para o planalto central na porção noroeste e para o planalto atlântico que abrange mais da metade do Estado, com a predominância dos “mares de morros” e altitude média de 700 m (CEMIG, 2012a).

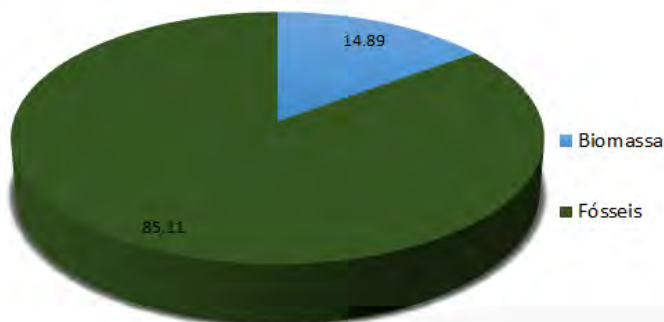
No que diz respeito à geração de energia, de acordo com dados presentes no Banco de Informações da Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015), Minas Gerais possui cerca de 665 empreendimentos de geração de energia elétrica em operação, totalizando uma potência gerada de 15.645.771 kW. Dentre estes empreendimentos, cerca de 80% são usinas hidrelétricas (UHE) e 15% são usinas térmicas (UTE). A Figura 3 e a Figura 4 apresentam a composição da matriz de energia elétrica de Minas Gerais. É possível perceber a predominância da geração hidroelétrica e termoelétrica e a participação pequena da geração de energia a partir de fontes renováveis.





**Figura 3: Composição da matriz energética mineira**

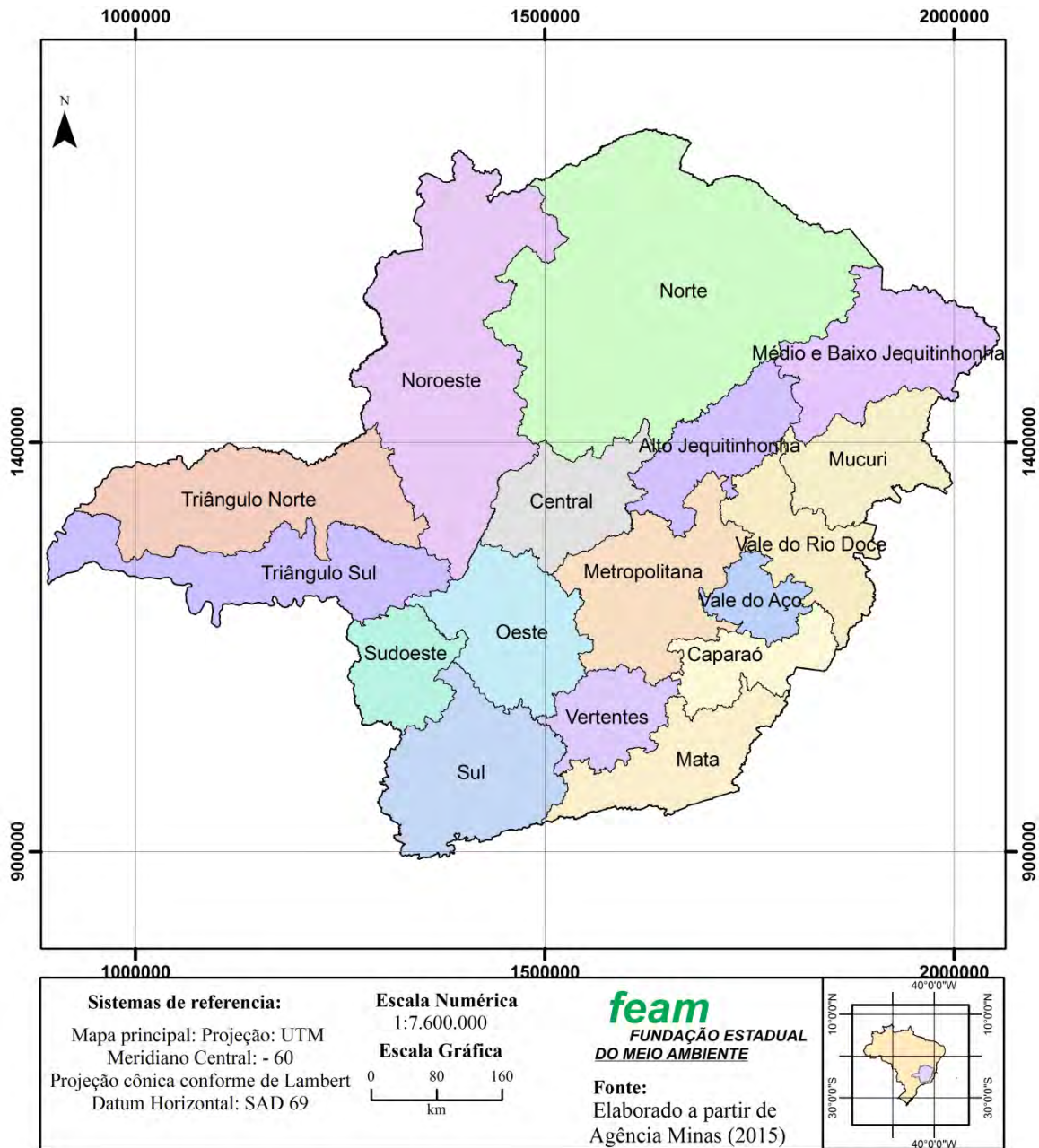
Fonte: Elaborado a partir de ANEEL, 2015



**Figura 4: Composição termoeletricidade mineira**

Fonte: Elaborado a partir de ANEEL, 2015

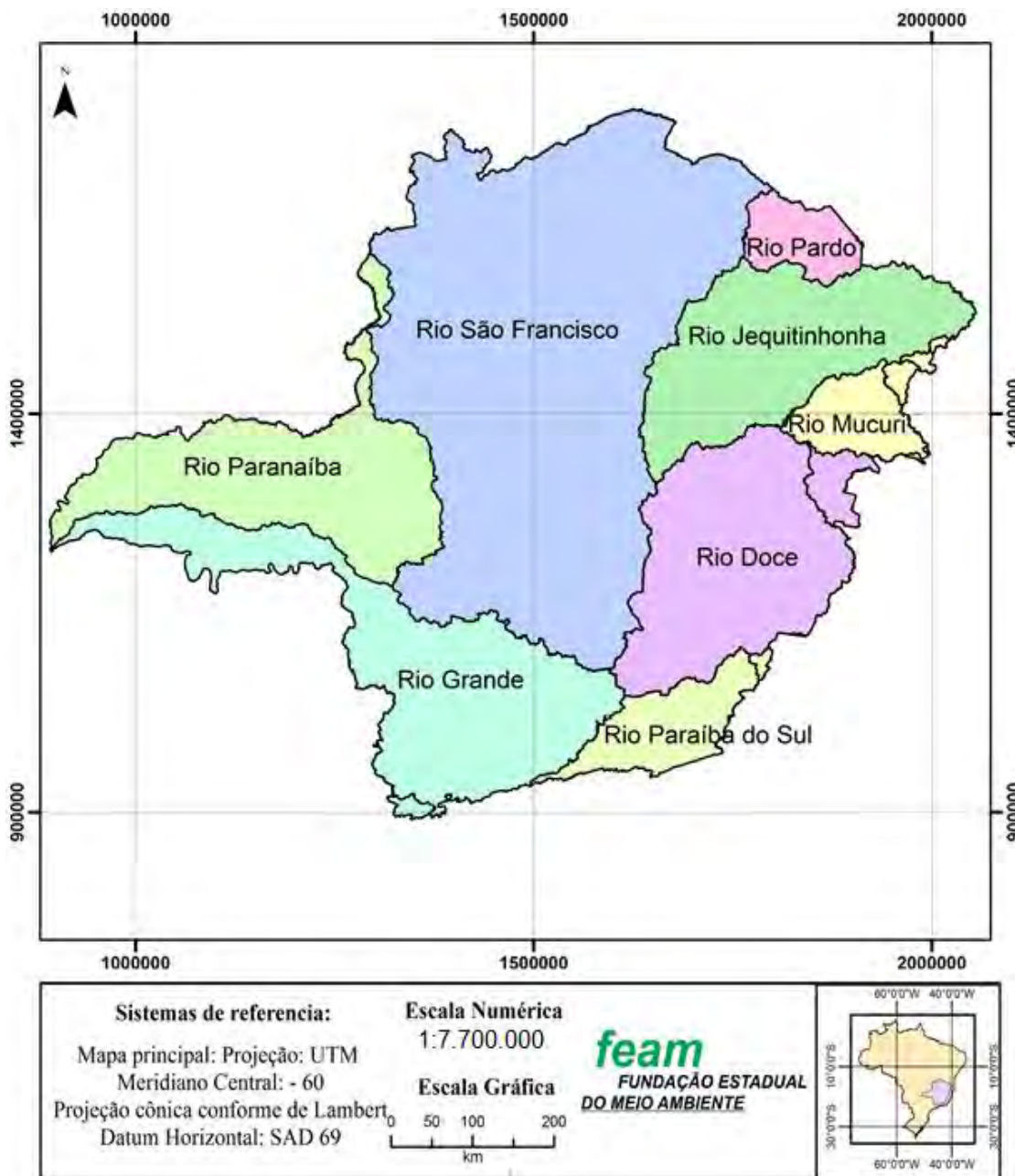
O Estado foi dividido em 17 Territórios de Desenvolvimento que são apresentados pela Figura 5. Minas Gerais possui um grande potencial hídrico em seus 58,6 milhões de hectares. As principais bacias que compõem a rede hidrográfica do Estado são as do Rio Doce, Rio Grande, Jequitinhonha, Mucuri, Paraíba do Sul, Paranaíba, Pardo e São Francisco. (PORTAL DO GOVERNO DE MINAS GERAIS, 2015)



**Figura 5: Territórios de desenvolvimento**

Fonte: Elaborado a partir de AGÊNCIA MINAS, 2015



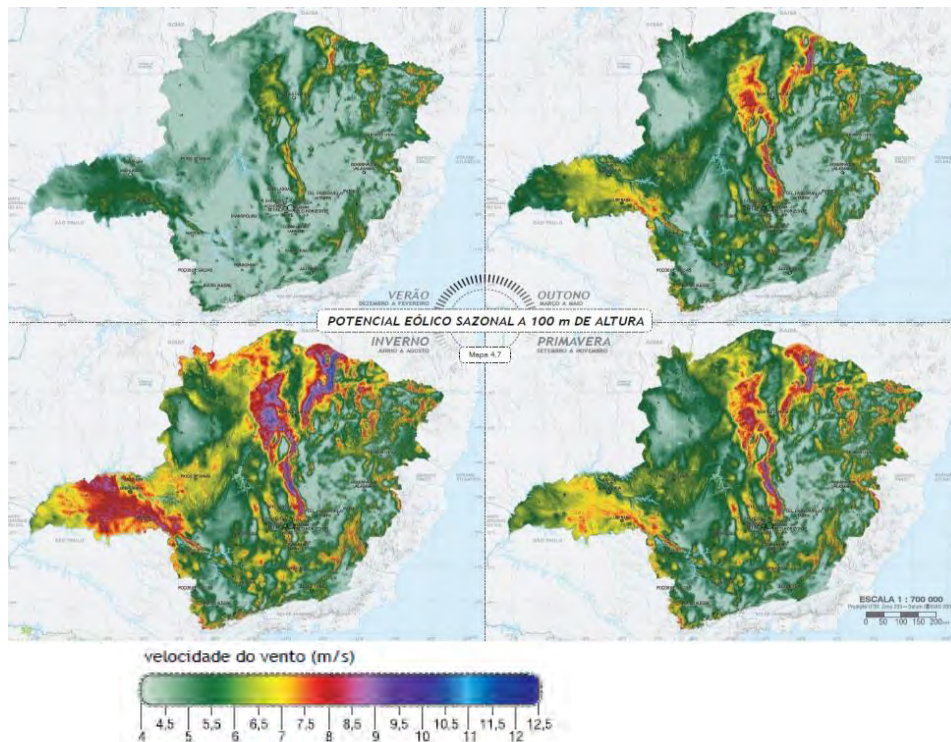


**Figura 6: Bacias hidrográficas**

Fonte: Elaborado a partir de PORTAL DO GOVERNO DE MINAS GERAIS, 2015

No que diz respeito às energias renováveis, o Brasil, bem como Minas Gerais, contam com potenciais expressivos. Segundo o "Atlas do Potencial Eólico Brasileiro" (AMARANTE; ZACK, 2001) o potencial eólico no Brasil chega a 143.000 MW, não incluindo neste cálculo o potencial *offshore*. Há de se salientar, que esse estudo foi elaborado segundo a tecnologia de geração elétrica dominante na época, que estava limitada a turbinas de baixa potência

instaláveis até 50 m de altura do solo. Um fator decisivo para a evolução da energia eólica no Brasil e no mundo é a tecnologia, visto que a capacidade das turbinas cresceu, nos últimos anos, de 50 kW para um valor acima de 9 MW, isso veio a permitir que as usinas eólicas constituíssem uma alternativa contundente para diversos níveis de demanda. No Brasil, as áreas com maior potencial eólico encontram-se nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste. O Atlas Eólico de Minas Gerais, concluído em maio do ano de 2010 pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), estimou o potencial eólico sazonal no estado, em três dimensões distintas, e os resultados indicam um potencial de 10,6 GW, 24,7 GW e 39,0 GW, nas altura de 50m, 75m e 100m, respectivamente. A Figura 5 apresenta o potencial a 100 m de altura.



**Figura 7: Potencial eólico sazonal a 100m de altura.**

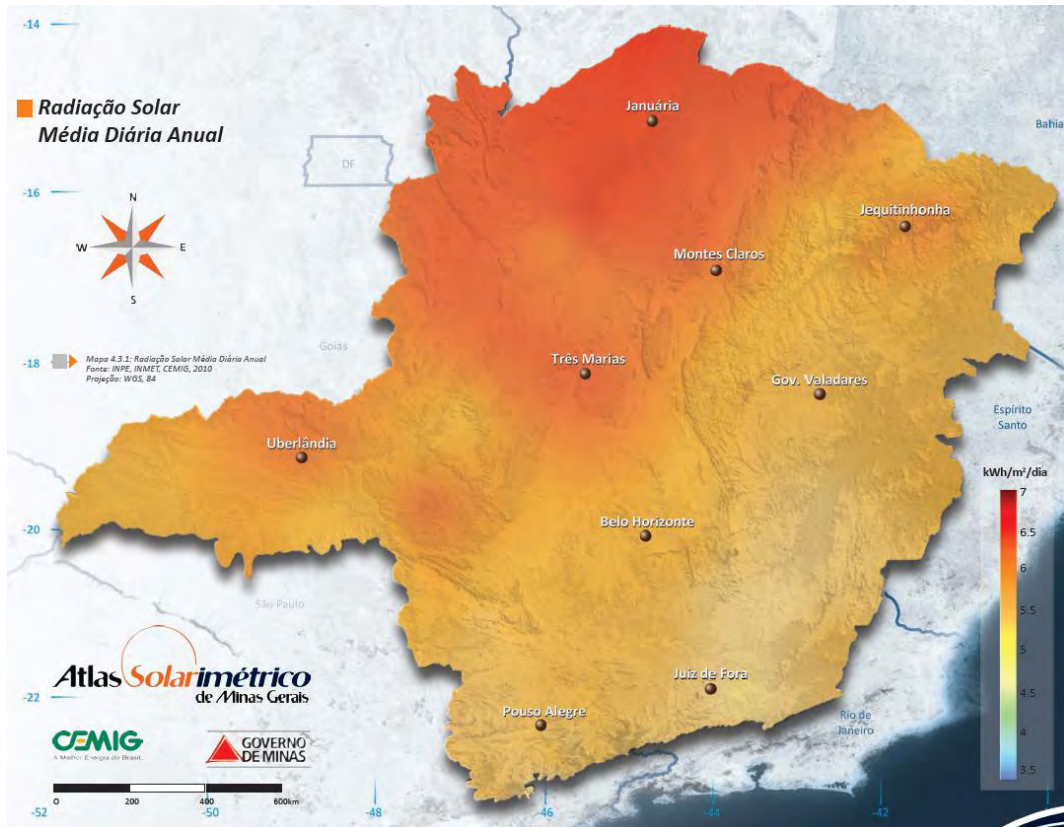
Fonte: CEMIG (2010)

No caso da energia solar, o Brasil encontra-se próximo à linha do Equador, de modo que a duração solar do dia – período de visibilidade do Sol ou de claridade – varia pouco durante o ano. As maiores variações ocorrem no Rio Grande do Sul. A média anual de energia incidente na maior parte do Brasil



varia entre 4 kWh/m<sup>2</sup>.dia e 5 kWh/m<sup>2</sup>.dia. Verificou-se por meio de estimativas que a região do Brasil com o menor índice de radiação solar incidente é o litoral norte de Santa Catarina, com cerca de 4,25 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto a região com o maior índice está localizada ao norte da Bahia com cerca de 6,5 kWh/m<sup>2</sup>. O potencial mínimo necessário para a instalação de sistemas fotovoltaicos planos sem concentração é de 2.000 kWh/m<sup>2</sup>.ano, ou seja, 5,5 kWh/m<sup>2</sup>.dia (valor diário anual médio). (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012a).

O território mineiro possui regiões que apresentam tais requisitos de radiação. Segundo mapa do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais (Figura 8), o Estado possui radiação solar global diária média anual entre 4,5 e 6,5 kWh/m<sup>2</sup>-dia.



**Figura 8: Radiação solar média diária anual em Minas Gerais**

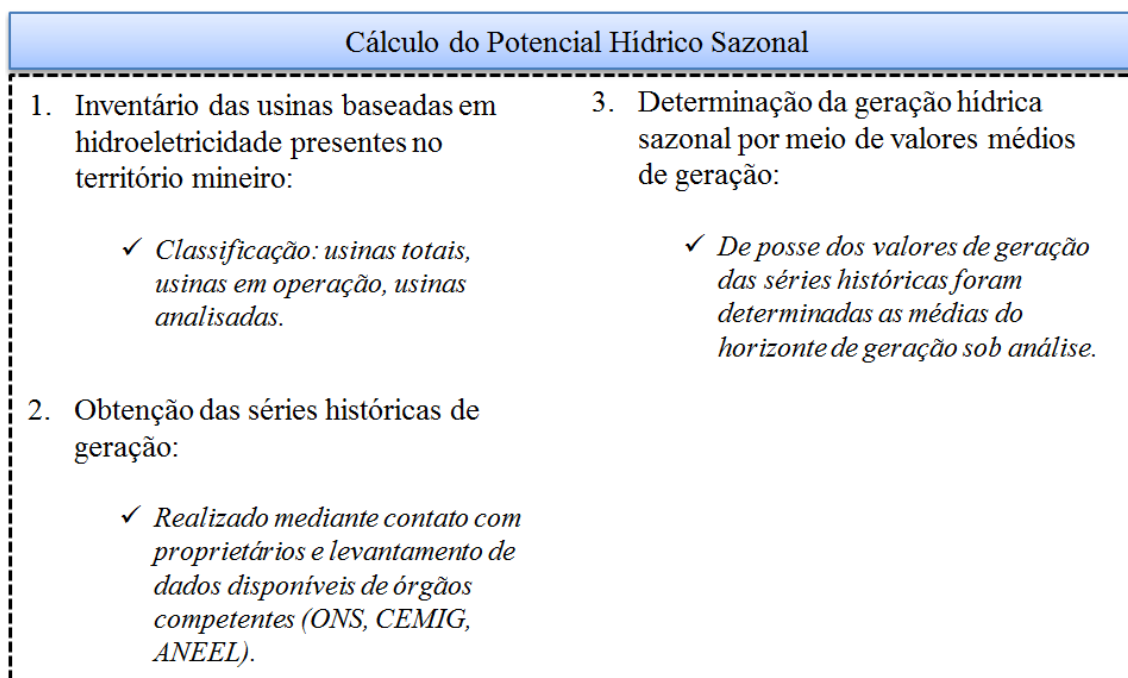
Fonte: CEMIG (2012a)

Em termos do desenvolvimento sustentável, para Minas Gerais, o Território Noroeste, e parte da Norte, configuram como sendo as melhores

áreas do estado para a implantação de usinas solares fotovoltaicas (BARBOSA et al, 2014).

### 3.2. CÁLCULO DO POTENCIAL HÍDRICO SAZONAL

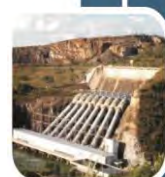
O cálculo do potencial hídrico sazonal seguiu as etapas descritas em detalhes pelo diagrama apresentado na Figura 9.



**Figura 9: Diagrama metodológico: Potencial hídrico**

Fonte: Elaborado pelos autores

A determinação do potencial hídrico partiu do inventário de todas as usinas baseadas em hidroeletricidade e de sua localização dentro do contexto dos Territórios de Desenvolvimento. Primeiramente, optou-se por desconsiderar as CGHs deste estudo, visando à diminuição do volume de dados. Em seguida, realizou-se o levantamento das séries históricas de geração das usinas junto aos órgãos competentes como Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Operador Nacional de Sistema Elétrico (ONS) e também mediante contato com proprietários. Algumas usinas não possuíam registros de sua geração, portanto, também precisaram ser excluídas da análise.

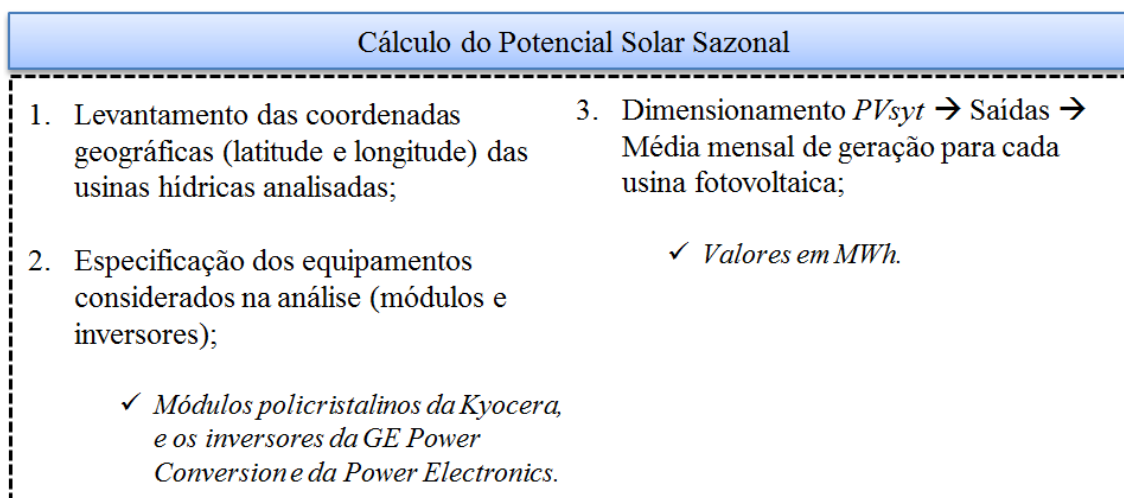


De acordo com dados da ANEEL em seu Sistema de Informações Georreferenciadas (Sigel) (ANEEL, 2015b), Minas Gerais possui, em valores totais, 99 usinas do tipo UHE e 404 usinas do tipo PCH. Dentre estas usinas, encontram-se em operação 44 UHEs e 94 PCHs (ANEEL, 2015a). Dentre as usinas em operação, foi possível levantar os dados históricos de geração de 41 UHEs e 78 PCHs, sendo que, no total, as simulações foram realizadas para 119 usinas.

O valor do potencial hídrico foi considerado como sendo a média mensal dos valores medidos nas séries históricas.

### 3.3. CÁLCULO DO POTENCIAL SOLAR SAZONAL

O cálculo do potencial solar sazonal seguiu as etapas descritas em detalhes pelo diagrama apresentado na Figura 10.



**Figura 10: Diagrama metodológico: Potencial solar**

Fonte: Elaborado pelos autores

Para a estimativa do potencial de geração garantido pela energia solar fotovoltaica, realizou-se o dimensionamento das usinas solares por meio do software *PVsyst Photovoltaic*. Esse software possui um banco de dados de radiação solar do *Meteonorm 6.1*. Foram fornecidas como entradas as latitudes e longitudes das hidrelétricas analisadas e a potência definida a partir da premissa de que a usina solar projetada possui a mesma potência (100%) que



a usina hídrica analisada. Os equipamentos escolhidos para simulação foram os módulos policristalinos da *Kyocera*, e os inversores da *GE Power Conversion* e da *Power Electronics*. Realizadas as simulações obteve-se, a partir do *software*, uma média mensal de geração de energia elétrica para cada usina fotovoltaica. Na Figura 11 são apresentadas as telas iniciais do *software* utilizado.

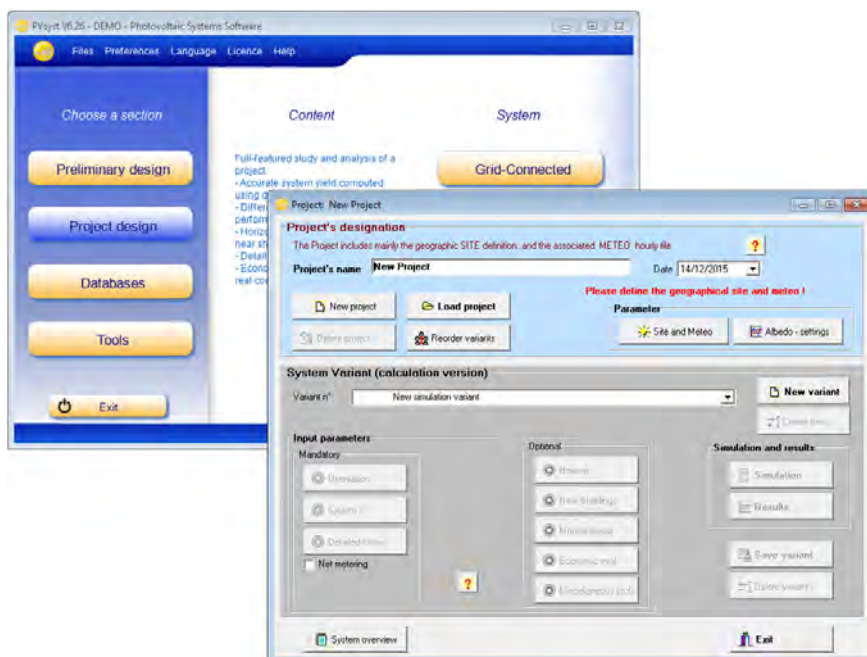


Figura 11: Interface inicial

Fonte: PVsyst Photovoltaic Software (2015).

### 3.4. CÁLCULO DO POTENCIAL EÓLICO SAZONAL

O cálculo do potencial solar sazonal seguiu as etapas descritas em detalhes pelo diagrama apresentado na Figura 12.



### Cálculo do Potencial Eólico Sazonal

1. Obtenção das séries históricas das velocidades dos ventos;  
*✓ Identificação da estação meteorológica mais próxima a cada usina hídrica analisada e obtenção de sua série histórica da velocidades.*
2. Determinação dos valores de velocidades não registradas por meio de valores médios históricos;
3. Extrapolação: 10 metros → 120 metros;  
*✓ Utilização da Lei da Potência ou Lei de Hellmann.*
4. Identificação do último ano de medições;
5. Dimensionamento *Windographer* → Saídas → Constantes Distribuição de *Weibull*;
6. Distribuição de *Weibull*;
7. Especificação da turbina considerada na análise;  
*✓ E115 da Enercon.*
8. Determinação da curva de potência do aerogerador;  
*✓ Dado fornecido pelo fabricante.*
9. Determinação do número de turbinas;
10. Média mensal de geração para cada usina eólica;  
*✓ Considera-se a Distribuição de Weibull, a curva de potência da turbina, horas de operação mensal e número de turbinas.*

**Figura 12: Diagrama metodológico: Potencial eólico.**

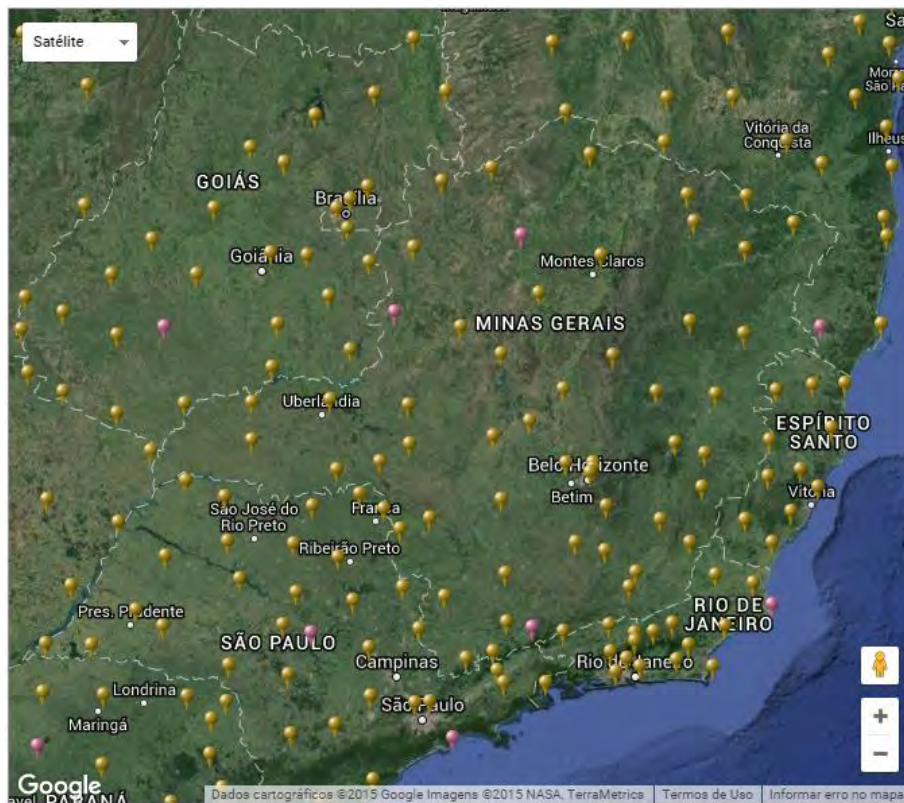
Fonte: Elaborado pelos autores

Para cálculo da geração eólica, utilizaram-se dados de velocidade de vento registrados pelas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2014), localizadas nas proximidades das usinas hidrelétricas analisadas. A partir da latitude e longitude das usinas hidrelétricas e das estações meteorológicas, identificou-se, por meio do *Google Earth*, a estação mais próxima de cada usina hidrelétrica e, conseqüentemente, das usinas eólicas dimensionadas.

Os dados históricos obtidos de velocidades dos ventos apresentam as medições realizadas diariamente e a cada hora do dia, nos últimos oito anos – podendo apresentar algumas variações neste período de acordo com a

estação. Tais dados necessitaram passar por um pré-tratamento devido às seguintes particularidades:

- ocorrência de valores não medidos de velocidade de vento;
- medições realizadas a 10 metros de altura, onde não se realiza aproveitamento energético para os sistemas considerados.



**Figura 13: Estações meteorológicas**

Fonte: INMET, 2015

Desta forma, primeiramente, realizou-se a substituição dos valores não medidos pela média entre os valores medidos no mesmo dia e na mesma hora, durante todos os anos da série histórica, desconsiderando valores iguais a zero. Em seguida, realizou-se uma extrapolação das velocidades de vento para uma altura adequada ao aproveitamento energético, no caso, de 120 metros.

Para o cálculo da velocidade do vento para uma altura de 120 metros, utilizou-se a Lei da Potência ou *Lei de Hellmann*, dada pela Equação 1 (ĐURISIC; MIKULOVIC, 2012); (GUALTIERI; SECCI, 2012); (GUALTIERI;



SAURO, 2011). Dentre as várias metodologias existentes, é a mais utilizada para estudos de caráter mais abrangente, sendo caracterizada por uma expressão simples capaz de fornecer resultados satisfatórios (BANÑUELOS-RUEDAS; ANGELES-CAMACHO; RIOS-MARCUELLO, 2010):

$$V_z = V_r \cdot \left(\frac{z}{z_r}\right)^n$$

Equação 1

Onde  $V_z$  é a velocidade para a altura  $z$ ;  $z$  é a altura a ser extrapolada;  $V_r$  é a velocidade medida na altura de referência;  $z_r$  é a altura de referência;  $n$  é o coeficiente de rugosidade do solo (AMARANTE; ZACK, 2001). Considerou-se um coeficiente de rugosidade do solo igual a 0,19 (classe de rugosidade média), uma vez que se considerou que as características das áreas onde se encontram as hidrelétricas aproximam-se de florestas, cercas vivas e arbustos (Tabela 1). Utilizou-se o mesmo coeficiente para o dimensionamento de todas as usinas eólicas.

O ano mais recente de medições foi considerado como ano típico, e serviu de base para o dimensionamento das usinas eólicas.

**Tabela 1: Coeficientes de rugosidade**

Tipo de Terreno	Coefficiente
Lago, oceano e solo liso	0,10
Florestas	0,15
Cercas vivas e arbustos	0,20
Pequenas cidades com poucas árvores e arbustos	0,25
Grandes cidades com altos edifícios e construções	0,30

Fonte: SANSIGOLO, 2005

Utilizou-se o software *Windographer*® para tratamento dos dados de velocidade do vento. Do tratamento dos dados obtêm-se parâmetros estatísticos para a definição do regime de ventos e do potencial eólico do local. (VIAJANTE; CAMACHO; ANDRADE, 2014). As velocidades e direções do vento apresentam tendências sazonais e diurnas bem definidas, dentro de seu

caráter estocástico. Portanto, para determinar-se a produção anual de energia, deve-se analisar uma distribuição probabilística que possa representar, da maneira mais fiel possível, o comportamento do regime de ventos numa região. A distribuição de *Weibull*,  $f(v)$ , dada pela Equação 2, é classificada como a mais adequada para descrever o regime dos ventos de um local e representar as frequências mensais de sua velocidade (SANSIGOLO, 2014).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

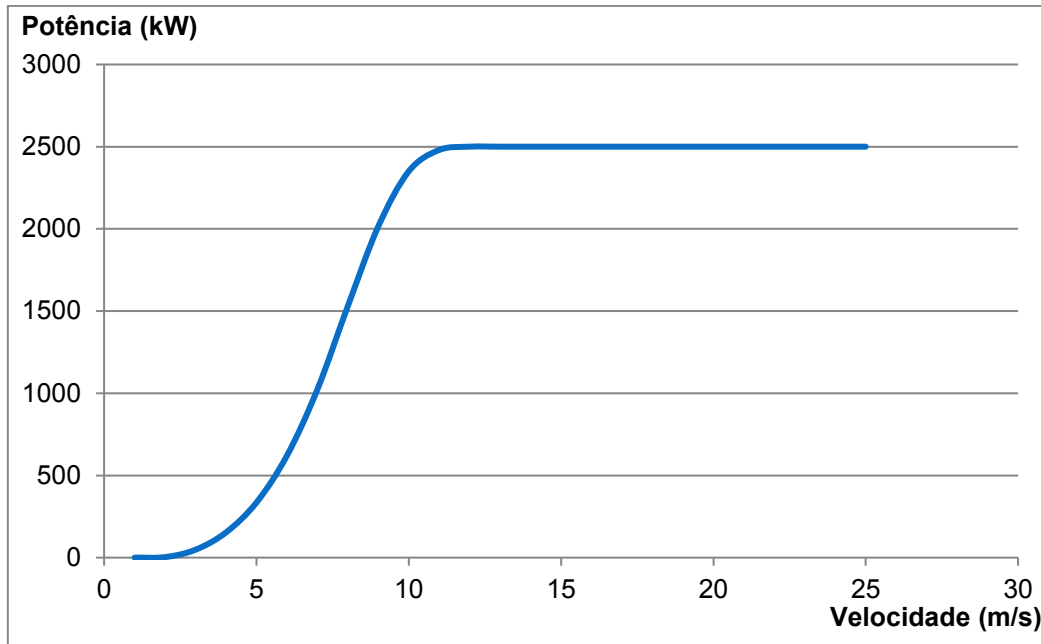
Equação 2

Onde  $v$  é a velocidade do vento registrada em  $m/s$ ;  $c$  é o fator de escala em  $m/s$  e  $k$  é o fator de forma (adimensional) (VIAJANTE; CAMACHO; ANDRADE, 2014). O fator de escala “ $c$ ” esta relacionado com a velocidade média do vento local. Já o fator de forma “ $k$ ” relaciona-se com a variância da velocidade do vento em torno da velocidade média.

O *Windographer*<sup>®</sup> fornece como saídas os parâmetros  $k$  e  $c$  (mensais) relacionados à distribuição de *Weibull*. De posse de tais valores é possível construir a distribuição de frequências conforme a Equação 2, que expressa a probabilidade de ocorrência de cada valor de velocidade de vento.

O próximo passo é dado pela especificação dos equipamentos considerados na análise e pelo levantamento da curva de potência da turbina utilizada (Figura 14). A turbina escolhida para simulação foi a *E115* da *Enercon*, com o diâmetro do rotor de 110 metros e potência nominal de 3.050 W.





**Figura 14: Curva de potência do aerogerador utilizado**

Fonte: Elaborado a partir de dados disponíveis em Windographer®, 2014

Para o cálculo do número de turbinas necessário em cada usina eólica utilizou-se a Equação 3.

$$N_{TURB} = \frac{P_{INST}}{P_N E115}$$

Equação 3

Onde  $N_{TURB}$  é o número de turbinas necessário;  $P_{INST}$  é a potência instalada da usina eólica e  $P_N E115$  é a potência nominal da turbina *E115*.

Finalmente, calcula-se a geração mensal de energia eólica por meio do cruzamento entre a curva de potência da turbina e a distribuição de *Weibull* gerada para cada localidade. Utilizou-se a Equação 4.

$$G_{ME} = \left[ \sum (W(v) \cdot P(v)) \right] \times 720 \times n$$

Equação 4

Onde  $G_{ME}$  é a geração média mensal de energia;  $v$  é a velocidade do vento em m/s;  $W(v)$  é a distribuição de *Weibull* para cada velocidade do vento;  $P(v)$  é a potência gerada pela turbina para cada velocidade do vento; 720 é o

número de horas consideradas no mês;  $n$  é o número de turbinas (VIAJANTE; CAMACHO; ANDRADE, 2014).

### 3.5. CÁLCULO DO POTENCIAL HÍBRIDO

Após a determinação dos potenciais, os resultados foram traçados e comparados graficamente para cada usina.

Considerou-se que a fonte híbrida complementa a geração, quando, nos meses em que a geração da fonte principal (hídrica) encontra-se com valor abaixo da média, a fonte híbrida for capaz de garantir a geração, impedindo o máximo possível que a energia firme diminua. Nos casos em que não se verifica a complementaridade conforme exposto, verifica-se a repotencialização das usinas, que corresponde a um acréscimo na energia gerada.

Considerou-se que a repotencialização de cada usina é dada pela parcela em valor percentual que a energia gerada pela fonte híbrida ( $E_{HÍBRIDA}$ ) – a área abaixo da curva de geração desta fonte – representa com relação à energia gerada pela fonte hídrica ( $E_{HÍDRICA}$ ).

$$\text{Repotencialização} = \frac{E_{HÍBRIDA}}{E_{HÍDRICA}} \cdot 100$$

Equação 5


Já a complementaridade é dada pelo produto entre a repotencialização e a razão entre os meses em que se verificou complementaridade ( $n_{COMP}$ ) e o total de meses do ano.

$$\text{Complementaridade} = \left( \frac{E_{HÍBRIDA}}{E_{HÍDRICA}} \cdot 100 \right) \cdot \frac{n_{COMP}}{12}$$


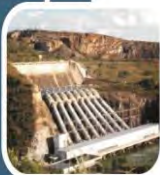
Equação 6




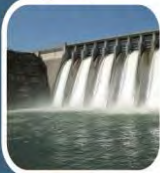
## 4. POTENCIAL DE COMPLEMENTARIDADE HIDRO- EÓLICA-SOLAR: RESULTADOS



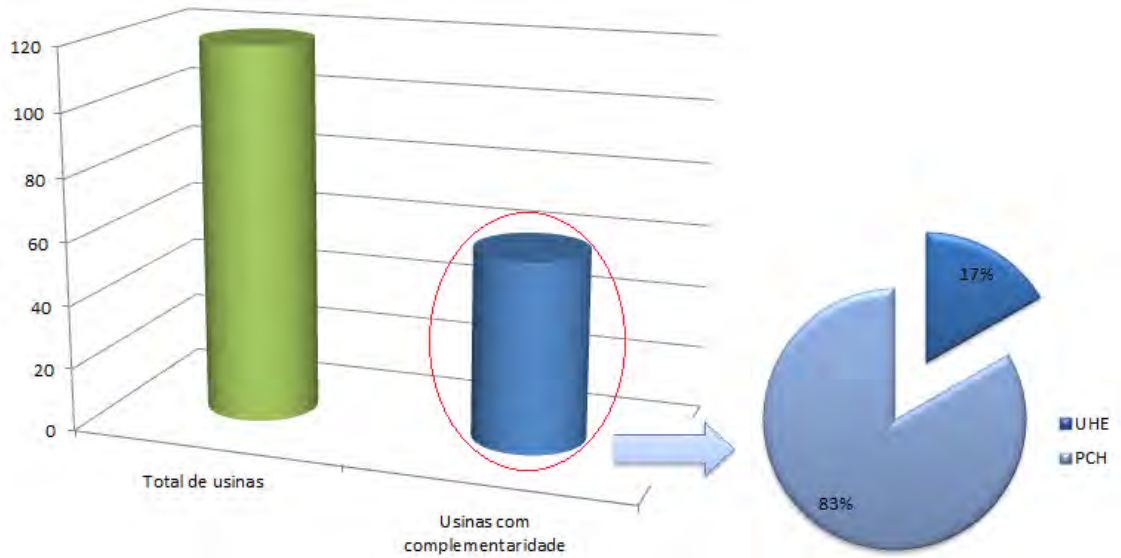
O número total de empreendimentos em operação no Estado de Minas Gerais, de acordo com dados da ANEEL (2015a), é de cerca de 260, considerando CGHs, PCHs e UHEs. Conforme já mencionado anteriormente, de forma a diminuir o volume de dados analisados, optou-se por desconsiderar as CGHs do presente estudo. De posse do total de UHEs e PCHs em operação em Minas Gerais, realizou-se o levantamento das séries históricas de geração de energia elétrica destas usinas. Este levantamento foi realizado mediante contato com os proprietários e de acordo com dados disponibilizados por órgãos oficiais, como CEMIG, ONS e ANEEL. Contudo, algumas usinas não puderam ter estes dados levantados, devido a não realização de medições. Desta forma, a análise foi realizada para 119 usinas, 41 UHEs e 78 PCHs, que puderam ter seus dados históricos de geração hidroelétrica determinados.



Dentre todas as usinas avaliadas, 60 delas apresentaram valores de complementaridade diferente de zero, de acordo com a abordagem aqui proposta. Mesmo as usinas que não apresentaram valores de complementaridade expressivos, tiveram ganhos importantes em termos de repotencialização. Verificou-se que os melhores resultados em termos de complementaridade foram alcançados pelas PCHs. Dentre as usinas analisadas, 50 PCHs apresentaram valores de complementaridade diferente de zero, no caso das UHEs, 10 usinas, conforme aponta a Figura 15.



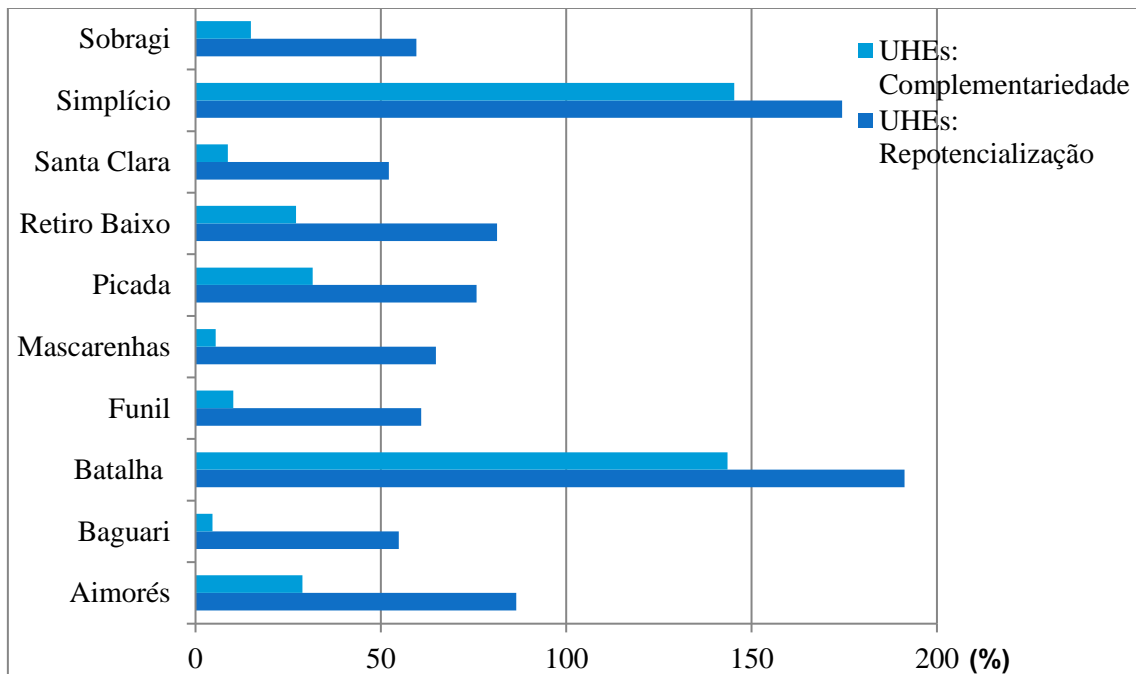




**Figura 15: Resultados: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

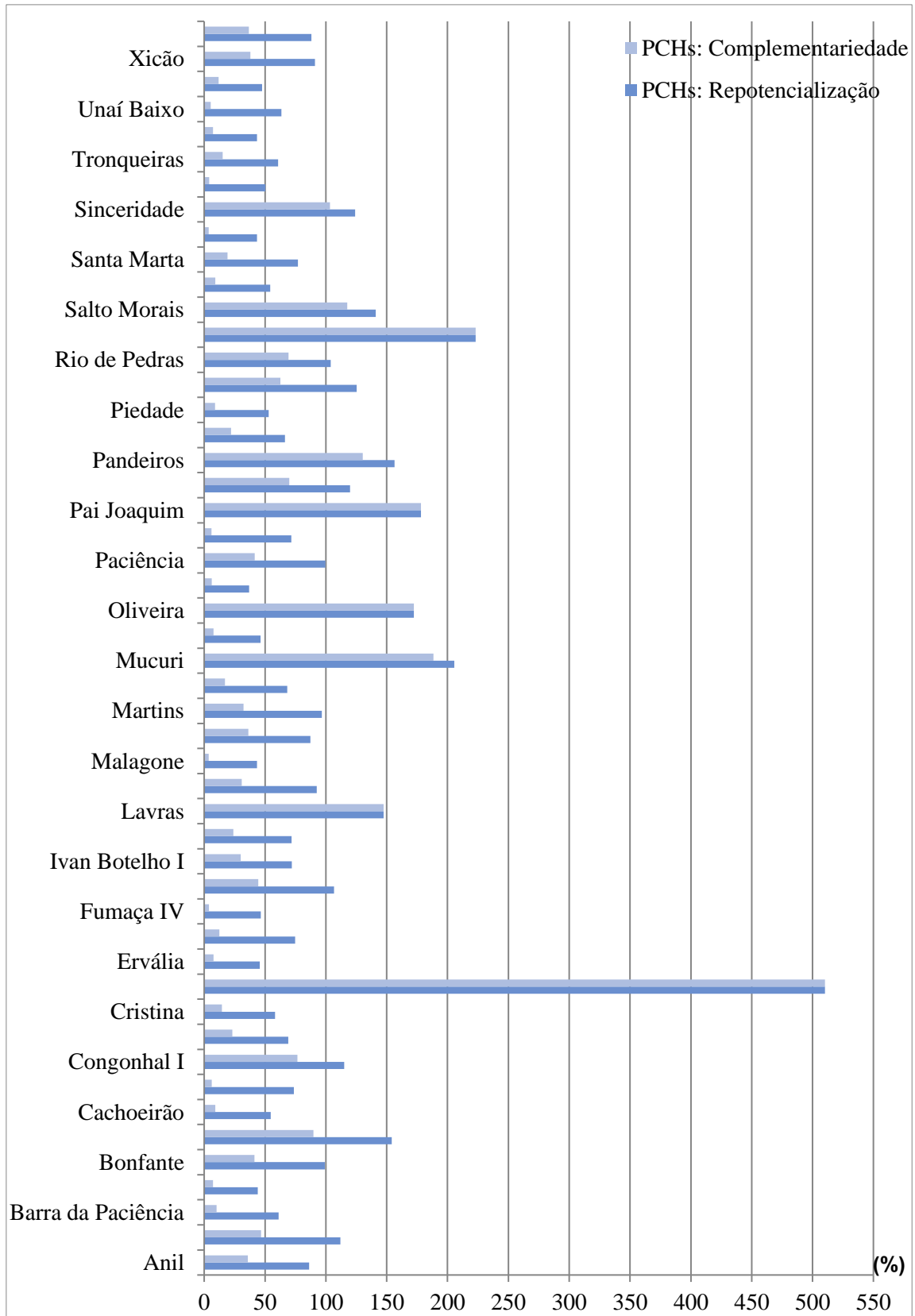
Os valores de complementaridade e repotencialização relacionados às usinas mencionadas estão apresentados pelas Figura 16 e Figura 17.



**Figura 16: Resultados: Complementaridade e repotencialização: UHEs**

Fonte: Elaborado pelos autores





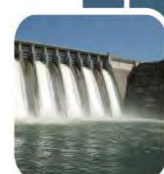
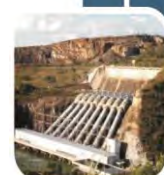
**Figura 17: Resultados: Complementariedade e repotencialização: PCHs**

Fonte: Elaborado pelos autores

As usinas que apresentaram complementaridade são descritas quanto a sua potência fiscalizada (PF), repotencialização (Repot), complementaridade (Comp), município e destino da energia gerada. Este último pode ser classificado em autoprodução de energia (APE), produção independente de energia (PIE), registro (REG), serviço público (SP).

**Tabela 2: Caracterização das usinas com complementaridade da geração.**

Usina	PF (kW)	Repot (%)	Comp(%)	Município	Destino
D Salto do Paraopeba	1,360	510.12	510.12	Nova Lima	APE
Mucuri	2,460	223.03	223.03	Jaceaba	PIE
Pai Joaquim	19,100	205.6	188.47	Carlos Chagas Sacramento/Santa Juliana	PIE
Oliveira	23,000	178.23	178.23	Oliveira	PIE
Cachoeira do Brumado	2,880	172.33	172.33		PIE
Lavras	2,340	89.89	154.1	Lima Duarte	PIE
Simplício	1,200	147.37	147.37	Barbacena	APE
Batalha	305,700	174.39	145.33	Além Paraíba/Sapucaia-RJ/Três Rios-RJ/Chiador	PIE
Pandeiros	52,500	191.29	143.47	Cristalina-GO/Paracatu	PIE
Salto Morais	4,200	156.46	130.38	Januária	SP
Sinceridade	2,394	141.06	117.55	Ituiutaba	PIE
Congonhal I	1,416	124.07	103.39	Manhuaçu	SP
Paiol	1,616	114.98	76.65	Baependi	PIE
Rio de Pedras	20,000	119.99	69.99	Frei Inocêncio/Mathias Lobato	PIE
Poquim	9,280	104.02	69.35	Itabirito	PIE/SP
Anna Maria	1,408	125.34	62.67	Itambacurí	PIE
Guary	1,680	111.99	46.67	Santos Dumont	PIE
Paciência	5,400	106.72	44.47	Santos Dumont	PIE
Bonfante	4,080	99.68	41.53	Matias Barbosa	PIE
Xicão	19,000	99.12	41.3	Comendador Levy Gasparian-RJ/Simão Pereira	PIE
Zé Tunin	1,808	91.03	37.93	Campanha	PIE/SP
Marmelos	8,000	88.18	36.74	Astolfo Dutra/Guarani	PIE
Anil	4,000	87.33	36.39	Juiz de Fora	PIE
Martins	2,080	86.33	35.97	Santana do Jacaré	PIE
	7,700	96.77	32.26	Uberlândia	PIE





Usina	PF (kW)	Repot (%)	Comp(%)	Município	Destino
Picada	50,000	75.81	31.59	Juiz de Fora	PIE
Machado Mineiro	1,720	92.52	30.84	Águas Vermelhas/São João do Paraíso	PIE
Ivan Botelho I	24,400	72.07	30.03	Descoberto/Guarani	PIE
Aimorés	330,000	86.49	28.83	Baixo Guandu-ES/Aimorés	PIE
Retiro Baixo	83,657	81.37	27.12	Curvelo-MG/Pompéu	PIE
Joasal	8,400	71.76	23.92	Juiz de Fora	PIE
Corrente Grande	14,000	69.16	23.05	Açucena/Gonzaga	PIE
Piau	18,012	66.47	22.15	Piau	PIE
Santa Marta	1,000	76.99	19.25	Grão Mogol	PIE
Monte Serrat	25,000	68.22	17.05	Monte Serrat	PIE
Tronqueiras	8,500	60.75	15.19	Coroaci	PIE
Sobragi	60,000	59.59	14.9	Belmiro Braga/Simão Pereira	PIE
Cristina	3,800	58.29	14.57	Cristina	PIE
F	3,792	74.85	12.47	Nova Lima	APE
Varginha	9,000	47.54	11.88	Chalé/São José do Mantimento	PIE
Barra da Paciência	23,000	61.13	10.18	Açucena/Gonzaga	PIE
Funil	180,000	60.91	10.15	Lavras/Perdões	PIE
Cachoeirão	27,000	54.68	9.11	Alvarenga/Pocrane	PIE
Santa Fé I	30,000	54.37	9.06	Santana do Deserto	PIE
Piedade	21,690	53.08	8.85	Monte Alegre de Minas	PIE
Santa Clara	60,000	52.16	8.69	Nanuque/Serra dos Aimorés	PIE
Ninho da Água	10,000	46.24	7.71	Delfim Moreira	PIE
Ervália	6,970	45.69	7.62	Ervália/Guiricema	SP
Benjamim Mário Baptista	9,000	44.1	7.35	Manhuaçu	PIE
Túlio Cordeiro de Mello	15,930	43.44	7.24	Abre Campo	PIE
Ormeo Junqueira Botelho	22,700	36.94	6.15	Muriaé	PIE
Codorna	1,944	73.69	6.14	Nova Lima	APE
Paes Leme	1,920	71.59	5.97	Passa-Vinte	PIE
Mascarenhas	189,000	64.81	5.4	Aimorés/Baixo Guandú-ES	PIE
Unaí Baixo	26,000	63.53	5.29	Unaí	PIE
Baguari	140,544	54.86	4.57	Alpercata/Fernandes Tourinho	PIE

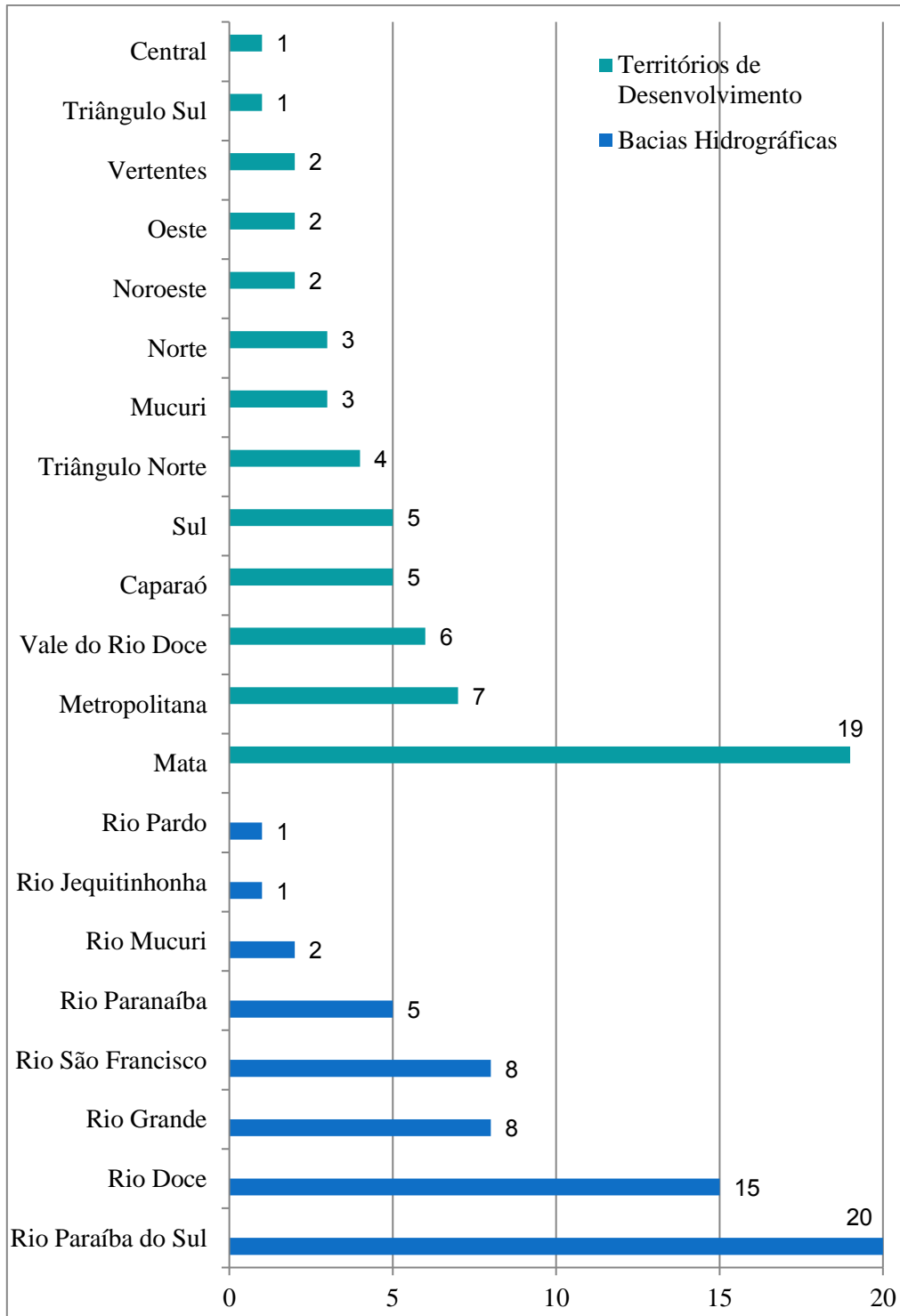
Usina	PF (kW)	Repot (%)	Comp(%)	Município	Destino
Sumidouro	2,120	50.28	4.19	Bom Jesus do Galho	REG
Fumaça IV	4,500	46.55	3.88	Caiana/Dores do Rio Preto-ES	PIE
Malagone	19,000	43.49	3.62	Uberlândia	PIE
São Gonçalo	11,000	43.48	3.62	São Gonçalo do Rio Abaixo	PIE

Fonte: Elaborado pelos autores baseado em resultados da pesquisa e com dados disponíveis em Aneel (2015).

#### 4.1. RESULTADOS: TERRITÓRIOS DE DESENVOLVIMENTO E BACIAS HIROGRÁFICAS

Os resultados da pesquisa foram agrupados de acordo com os Territórios de Desenvolvimento e com as Bacias Hidrográficas do Estado. O território que apresentou o maior número de usinas com complementaridade foi o Território da Mata com 19 usinas. Com relação às Bacias Hidrográficas, a que apresentou maior quantidade foi a do Rio Paraíba do Sul. O número de usinas nos demais territórios e bacias é apresentado na Figura 18.





**Figura 18: Resultados: Territórios de Desenvolvimento e Bacias Hidrográficas**

Fonte: Elaborado pelos autores

Nas seções seguintes, são apresentados os resultados gráficos relacionados aos potenciais hídrico, solar e eólico de cada usina hidráulica analisada. Juntamente com os gráficos são apresentados o território de

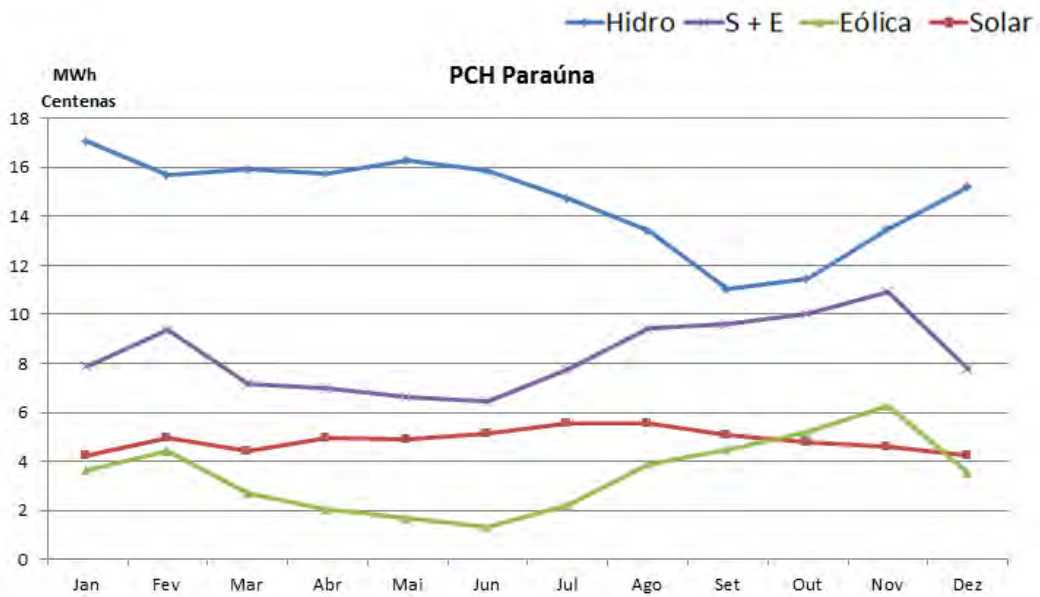


desenvolvimento e a bacia hidrográfica aos quais pertence cada usina e os valores de complementaridade e repotencialização, calculados mediante as metodologias descritas anteriormente.

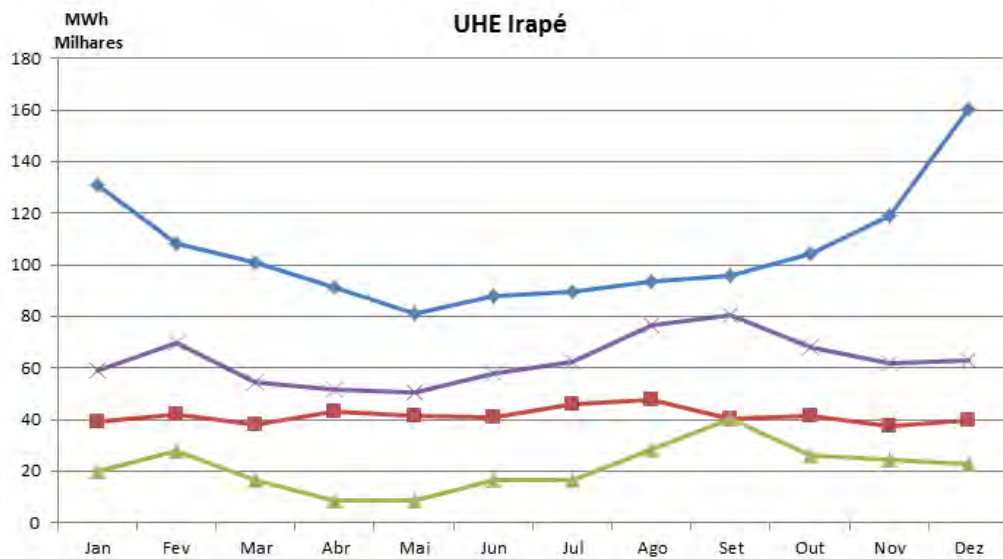
#### **4.1.1. Alto Jequitinhonha**

No Território do Alto Jequitinhonha foram analisadas duas usinas, onde não foi verificada a complementaridade da geração em nenhum dos casos, contudo, verificou-se a repotencialização das usinas em valores superiores a 50%. É possível verificar que nesta região do Estado, a fonte solar apresenta baixa variação sazonal ao longo do ano. A fonte eólica apresenta maiores variações ao longo do ano, com maior disponibilidade nos meses de agosto-setembro-outubro-novembro, contudo, tais variações não são bruscas ou de grandes amplitudes.





56,80% Repotencialização; Território Alto Jequitinhonha;  
 Bacia do Rio São Francisco.



59,84% Repotencialização; Território Alto Jequitinhonha;  
 Bacia do Rio Jequitinhonha.

**Figura 19: Usinas analisadas**

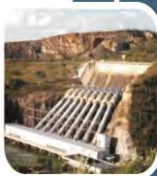
Fonte: Elaborado pelos autores

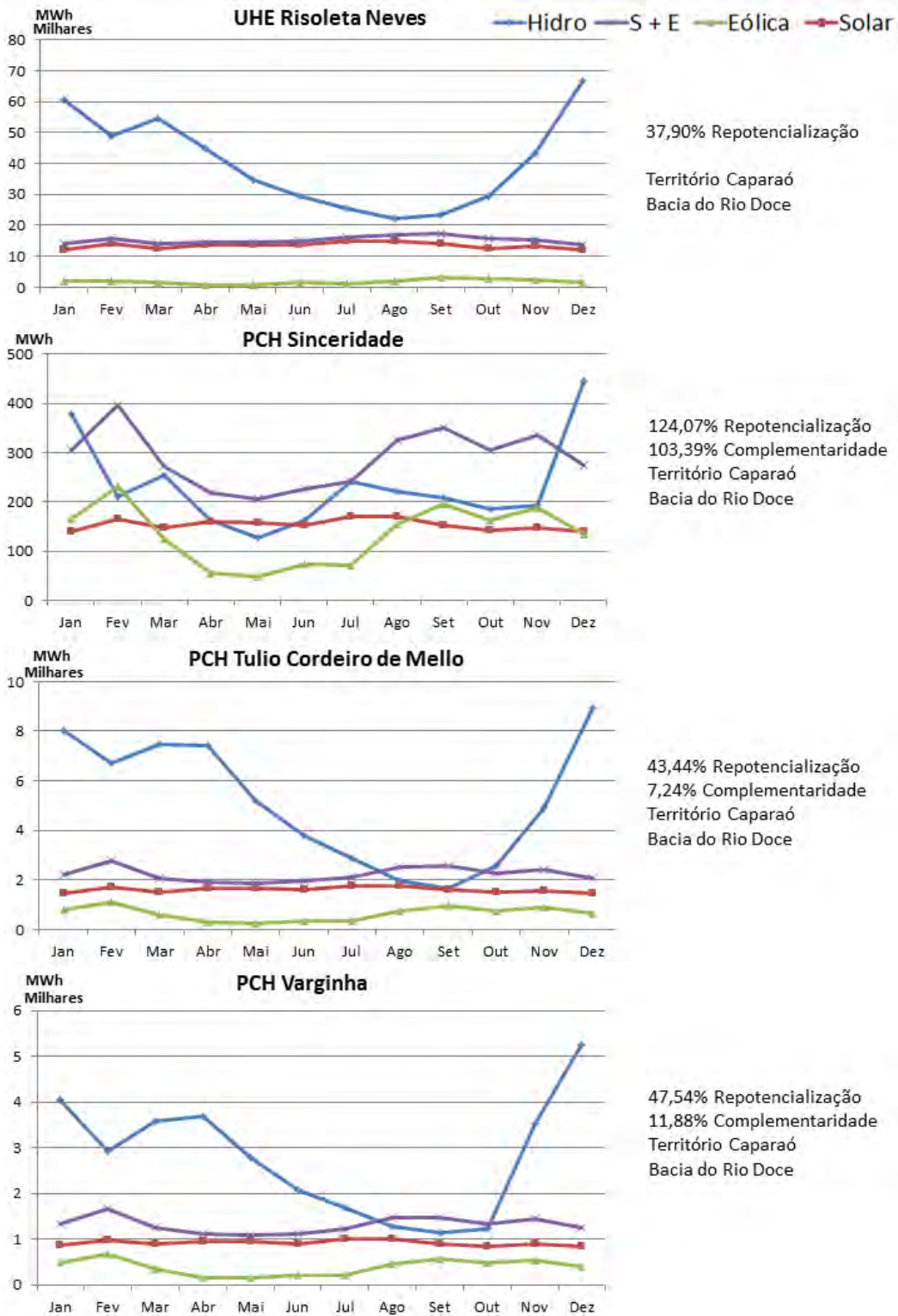




#### 4.1.2. Caparaó

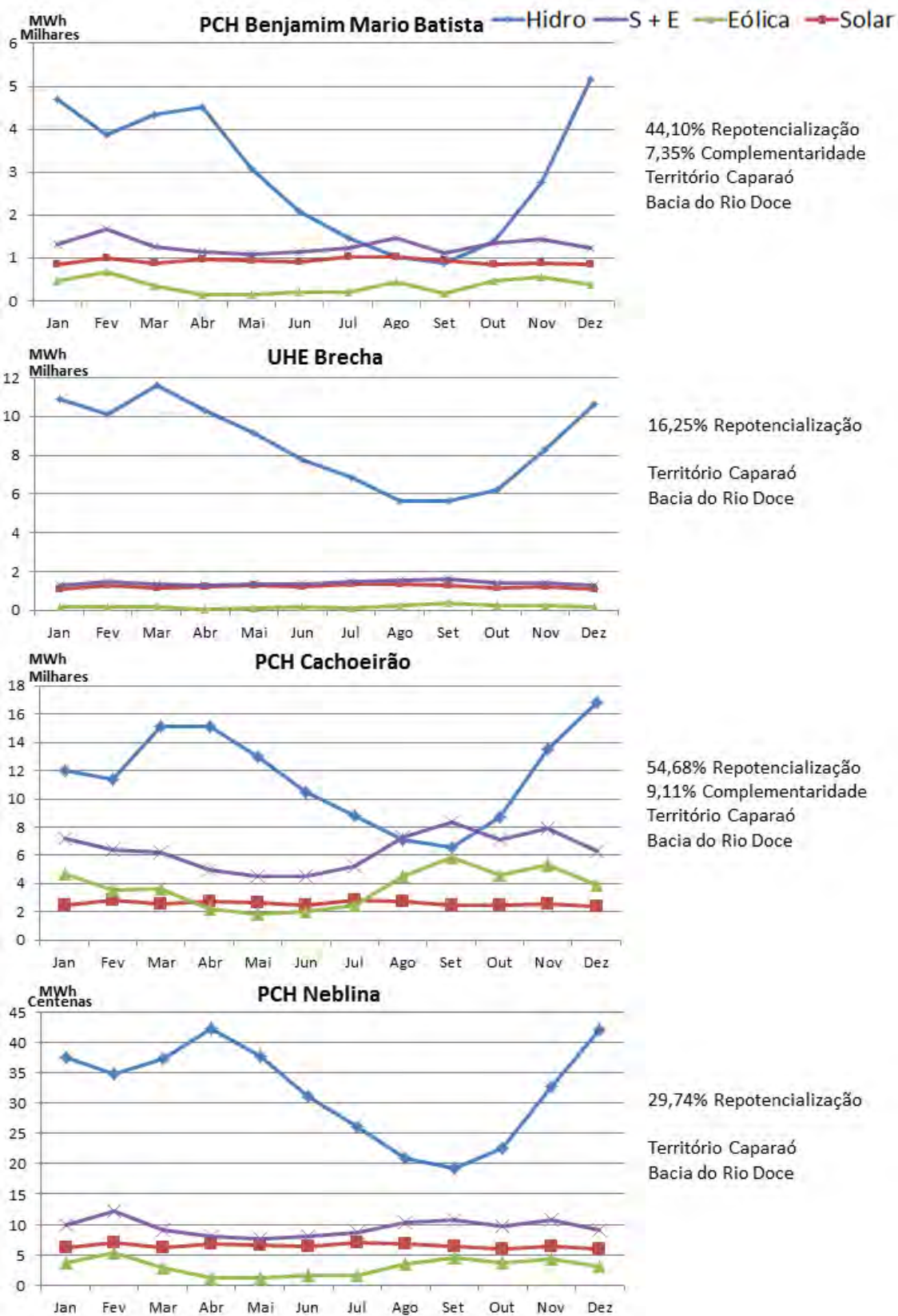
No Território do Caparaó foram analisadas 11 usinas, dentre as quais 4 apresentaram valores de complementaridade da geração (mínimo 7,24%; máximo 103,39%). O caso mais promissor foi o da PCH Sinceridade, com 124,07% de repotencialização e 103,39% de complementaridade. Verifica-se que, para tal usina, as fontes eólica e solar são capazes de oferecer uma potência superior a que é gerada atualmente. As demais usinas apresentaram valores de repotencialização (mínimo 16,25%; máximo 124,07%), ou seja, apesar de não apresentarem complementaridade em seus perfis de geração, podem ter suas potências geradas aumentadas por meio da inserção da geração híbrida. Casos promissores são, por exemplo, a PCH Cachoeirão e a PCH Varginha, com 54,68% e 47,54% de repotencialização, respectivamente.





**Figura 20: Usinas analisadas**

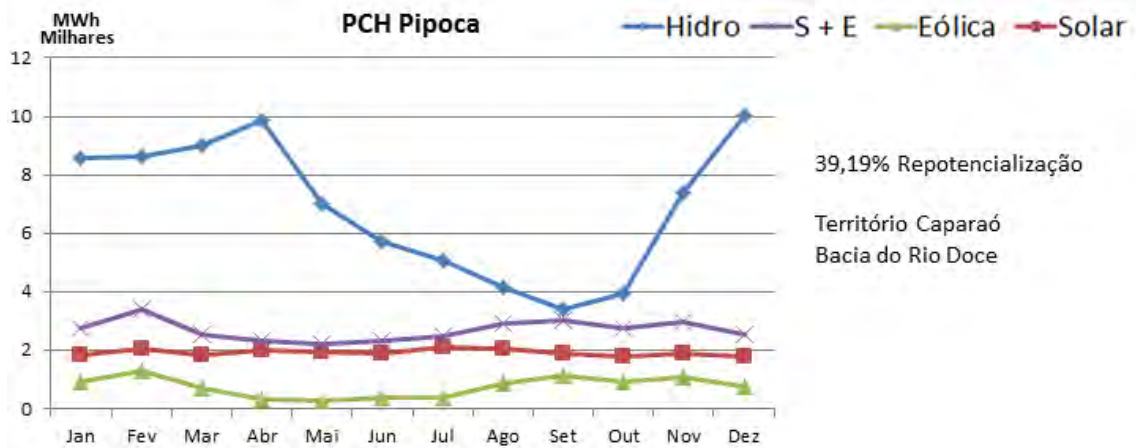
Fonte: Elaborado pelos autores



**Figura 21: Usinas analisadas**

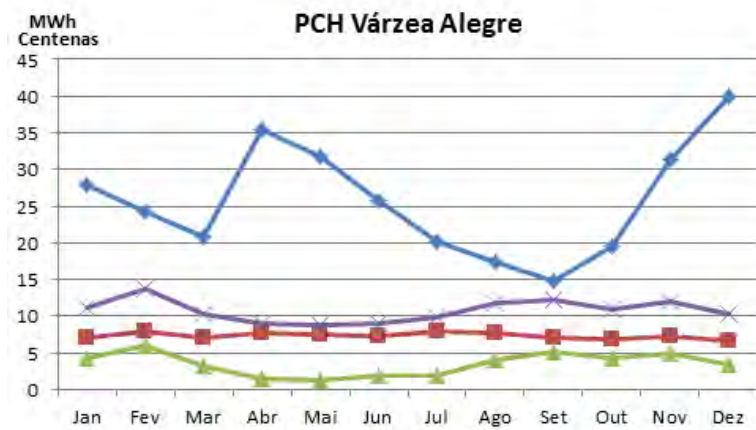
Fonte: Elaborado pelos autores





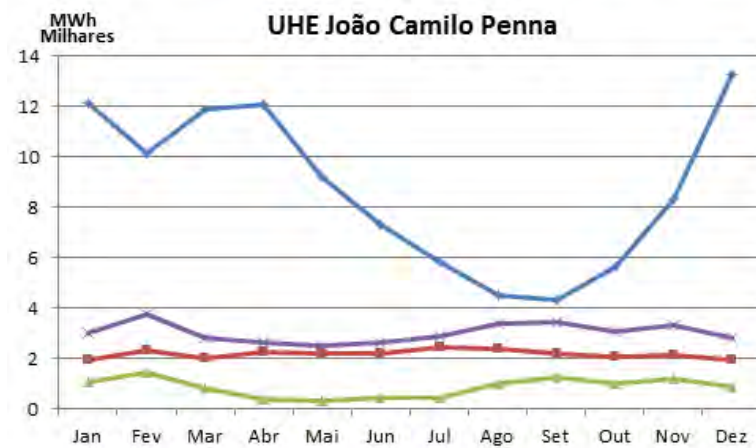
39,19% Repotencialização

Território Caparaó  
 Bacia do Rio Doce



41,71% Repotencialização

Território Caparaó  
 Bacia do Rio Doce



34,57% Repotencialização

Território Caparaó  
 Bacia do Rio Doce

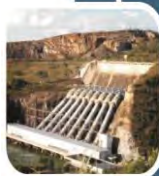
**Figura 22: Usinas analisadas**

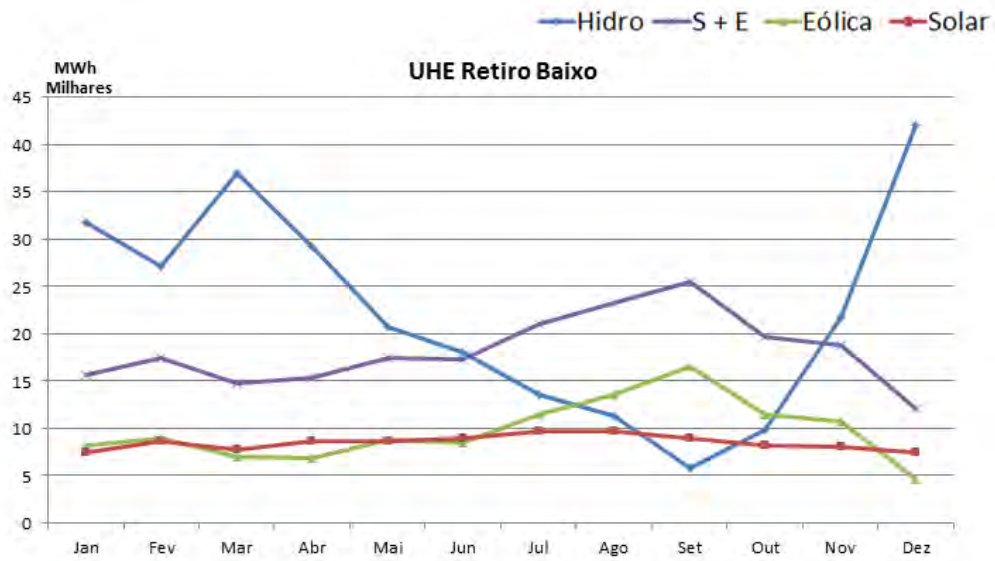
Fonte: Elaborado pelos autores



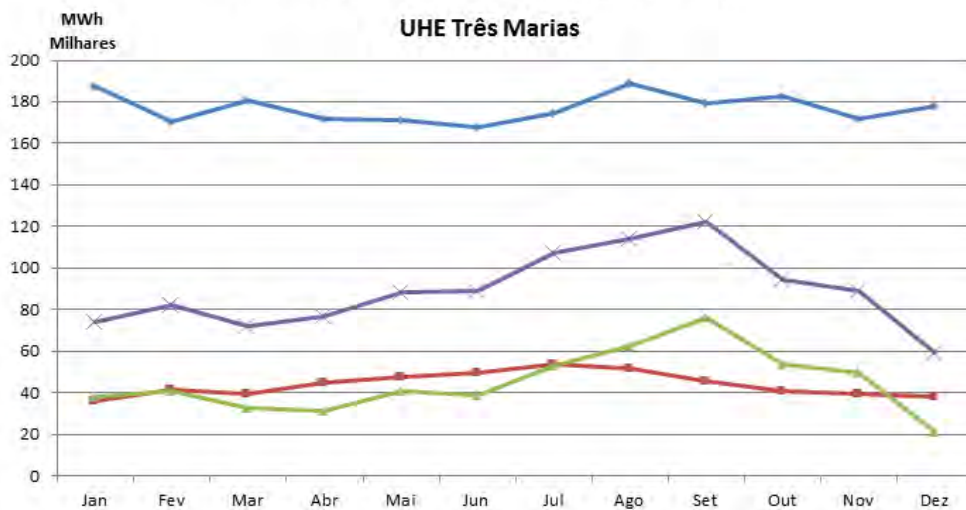
#### 4.1.3. Central

No Território Central foram avaliadas 2 usinas, onde a UHE Retiro Baixo apresentou valor de complementaridade de 27,12% e repotencialização de 81,37%, e a UHE Três Marias apresentou valor de repotencialização de 50,25%, ou seja, cerca de metade da potência gerada pela usina. Apesar dos valores de complementaridade alcançados terem sido relativamente baixos, é importante ressaltar que, ambos os casos analisados tratam de UHEs com altas potências instaladas. Logo, a repotencialização destas usinas em valores acima de 50% representa quantidades expressivas de energia garantidas pelas fontes renováveis, o que pode caracterizar o Território Central como uma região bastante atrativa para a geração renovável.





81,37% Repotencialização; Território Central;  
 27,12% Complementaridade; Bacia do Rio São Francisco.



50,25% Repotencialização; Território Central;  
 Bacia do Rio São Francisco.

**Figura 23: Usinas analisadas**

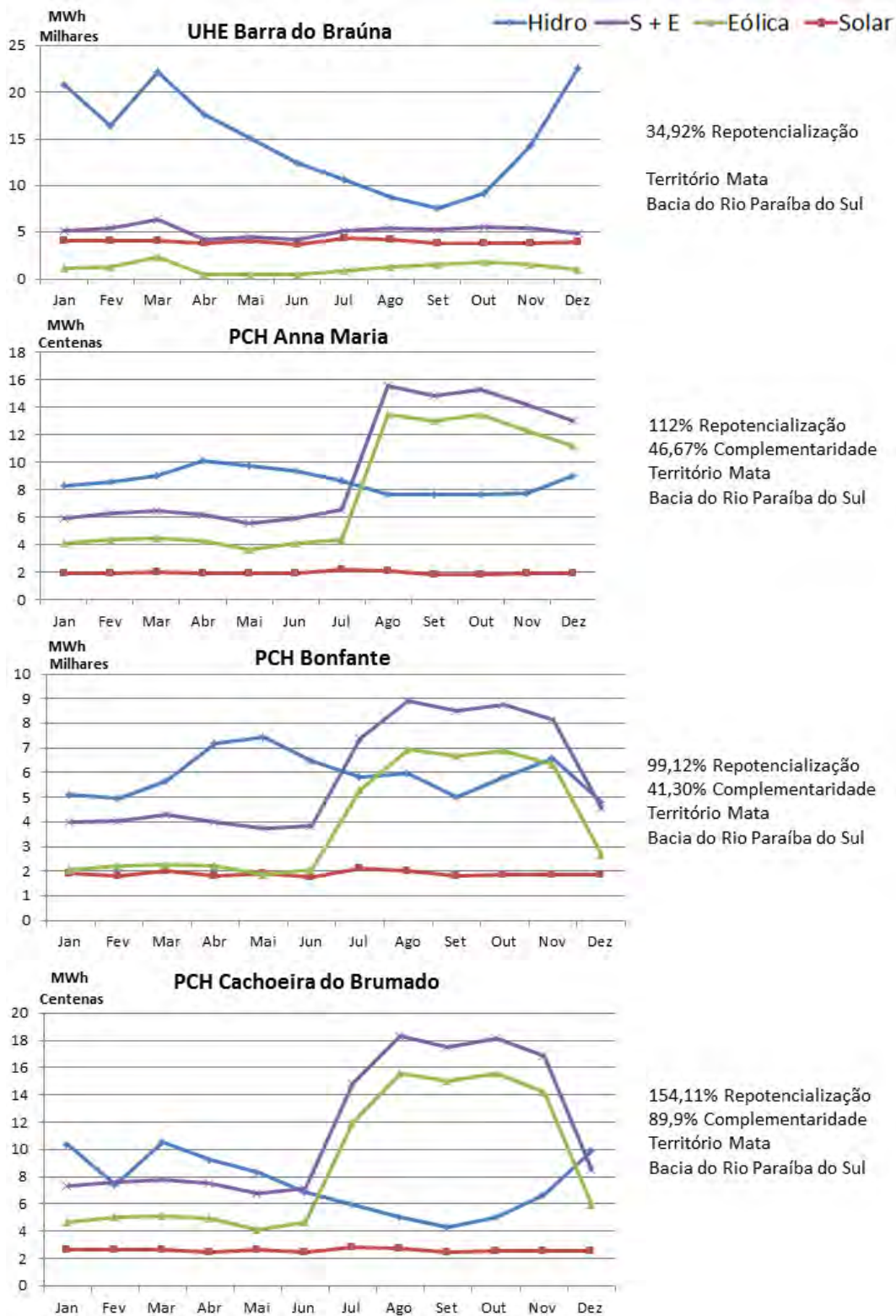
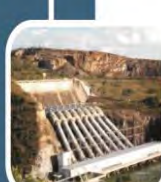
Fonte: Elaborado pelos autores

#### 4.1.4. Mata

No Território da Mata foram analisadas 28 usinas, dentre elas 19 apresentaram valores de complementaridade da geração (mínimo 3,88%; máximo 145,33%). As demais usinas apresentaram valores de repotencialização (mínimo 24,3%; máximo 174,39%). Casos promissores foram os da UHE Simplício (174,39% repotencialização e 145,33% complementaridade), e das PCHs: Cachoeira do Brumado (154,10% repotencialização e 89,89% complementaridade), Anna Maria (111,99% repotencialização e 46,67% complementaridade), Guary (106,72% repotencialização e 44,47% complementaridade), Paciência (99,68% repotencialização e 41,53% complementaridade), e Bonfante (99,12% repotencialização e 41,30% complementaridade). Tais usinas, além de apresentarem complementaridade em seus perfis de geração, possuem valores de repotencialização próximos dos 100%, o que significa que as fontes renováveis são capazes de fornecer quase totalidade da energia gerada pela fonte hidráulica, anualmente. Os resultados apontam ainda, para a predominância de usinas do tipo PCH entre os resultados mais promissores, devido às suas menores potências instaladas.

Novamente, a geração solar apresenta pouca variação anual, e a energia eólica apresenta variações mensais mais significativas. Nota-se, portanto que a energia solar cumpre um papel ligado a repotencialização das usinas, enquanto a energia eólica garante uma maior estabilização sazonal do montante de energia gerado.

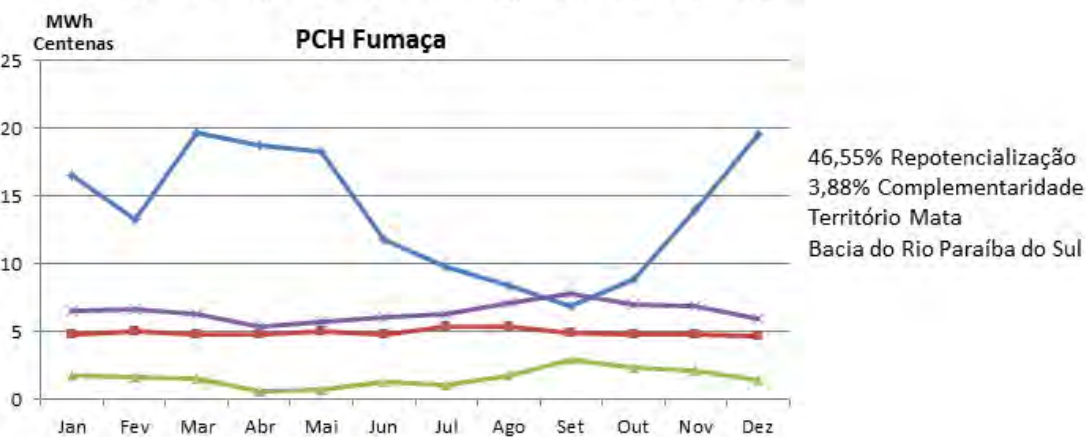
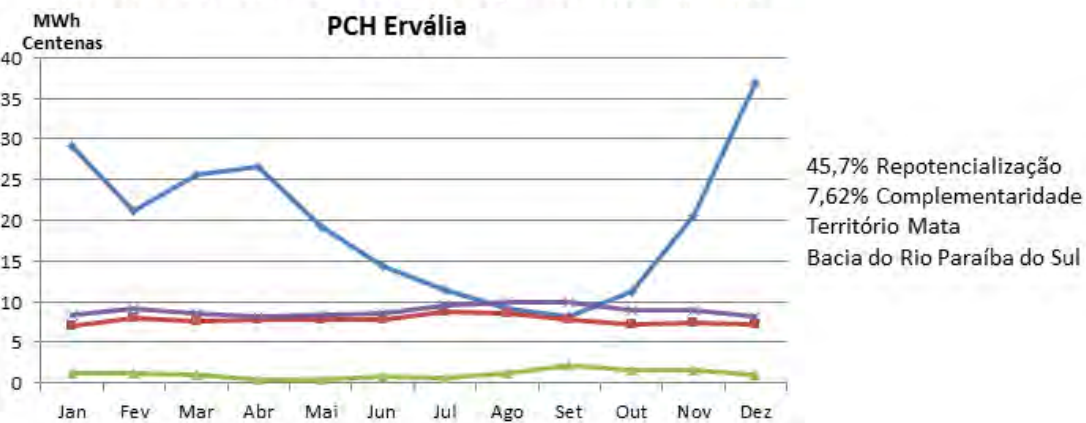
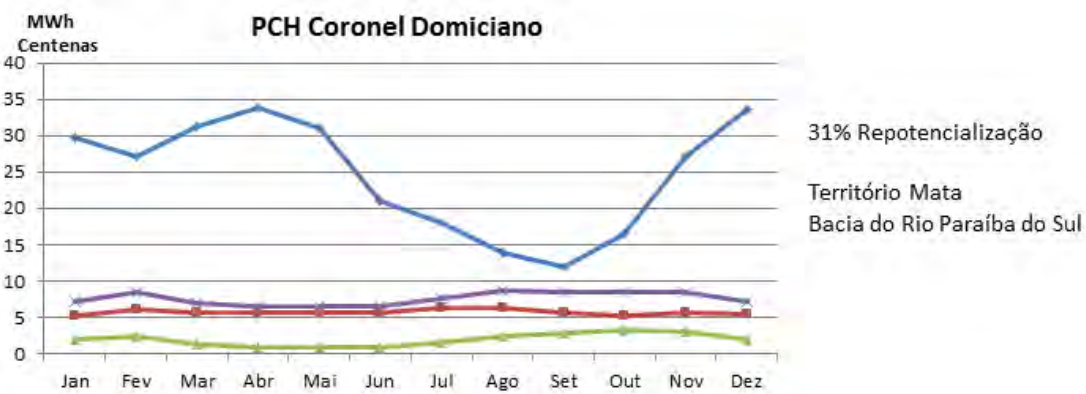
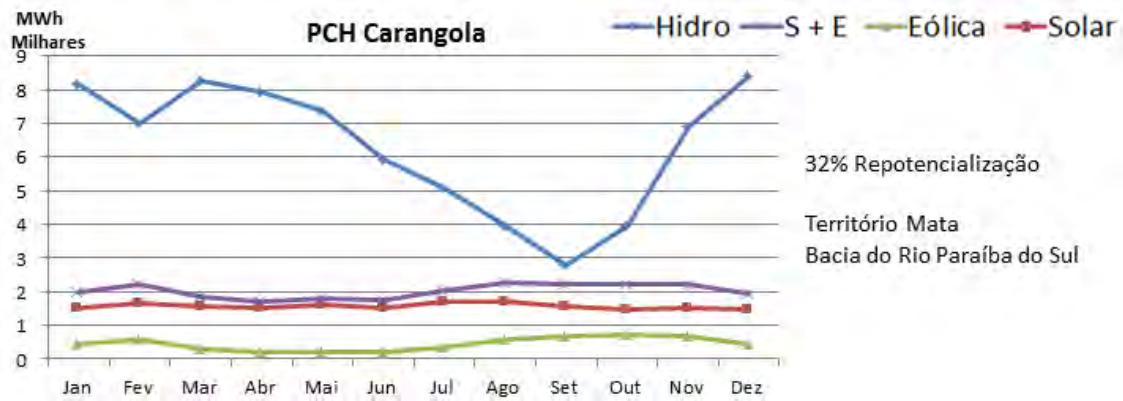




**Figura 24: Usinas analisadas**

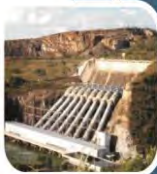
Fonte: Elaborado pelos autores

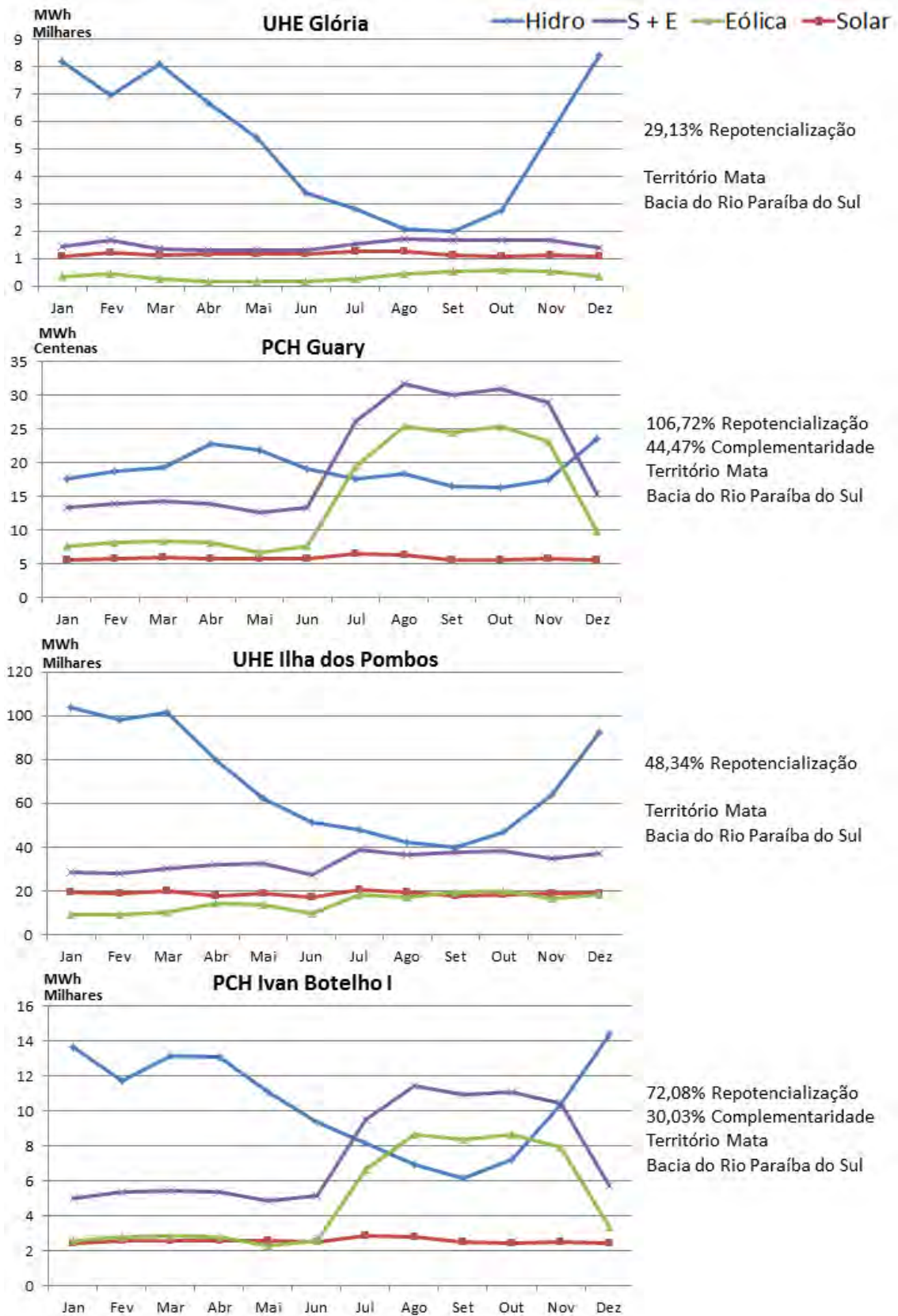




**Figura 25: Usinas analisadas**

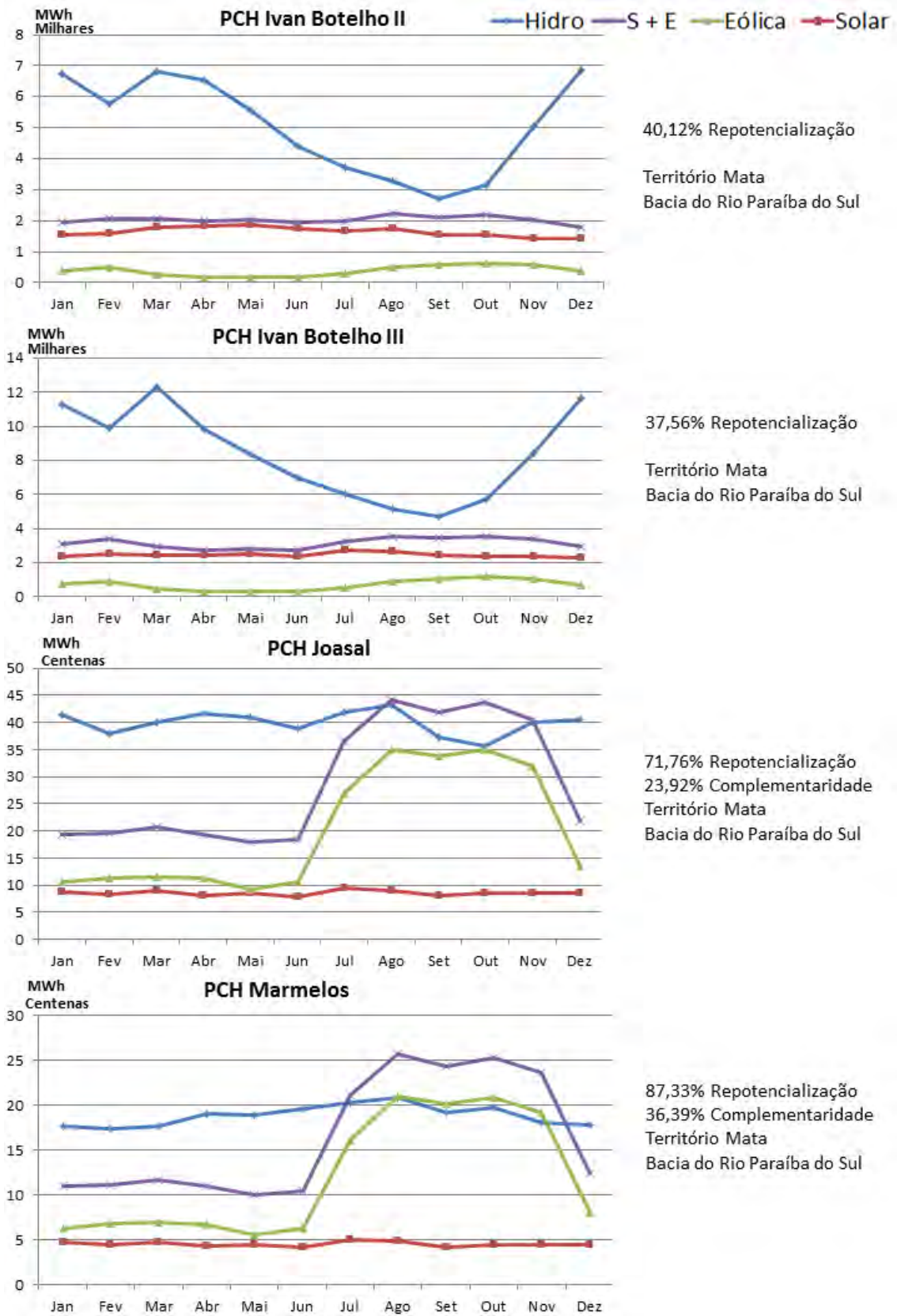
Fonte: Elaborado pelos autores





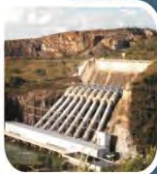
**Figura 26: Usinas analisadas**

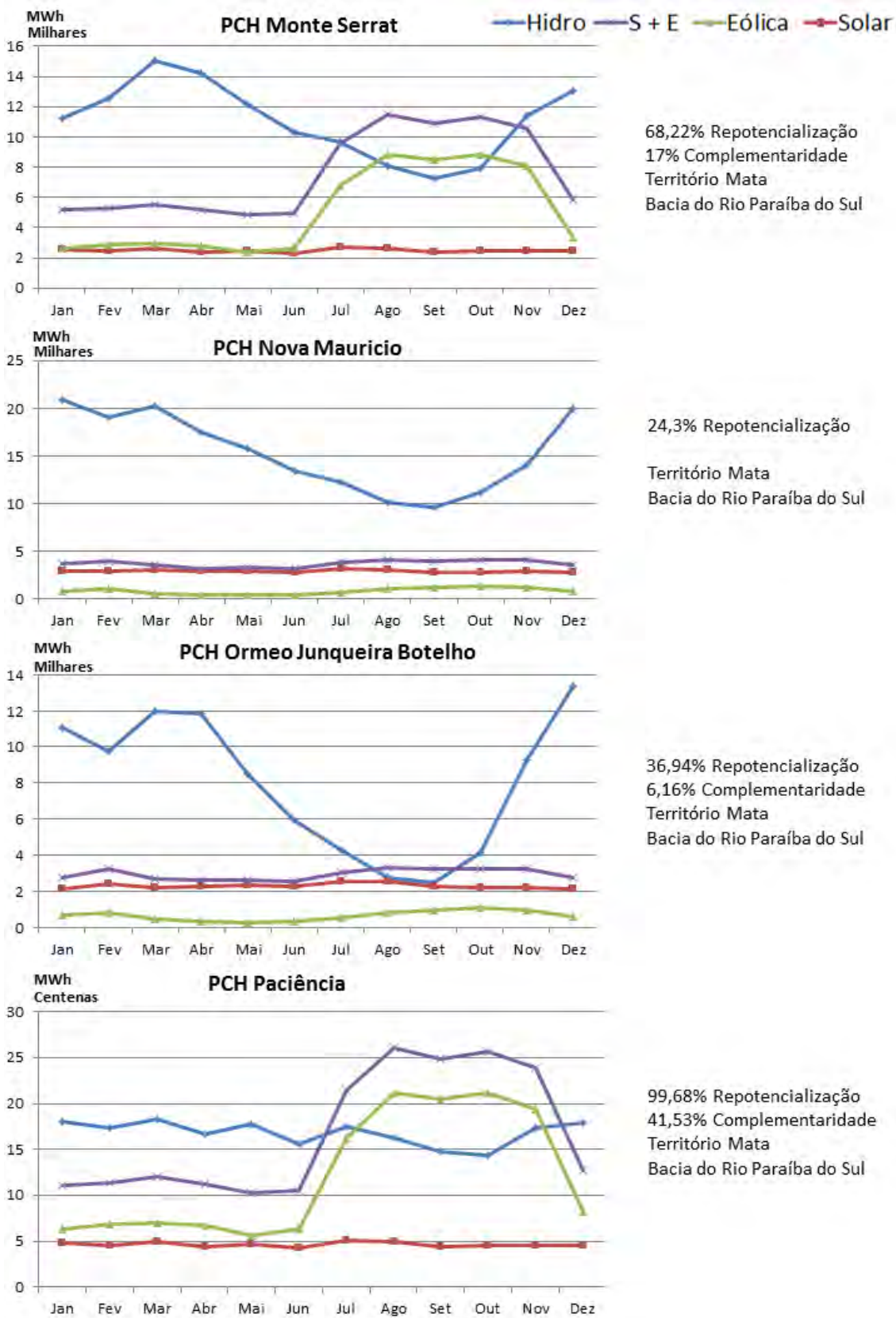
Fonte: Elaborado pelos autores



**Figura 27: Usinas analisadas**

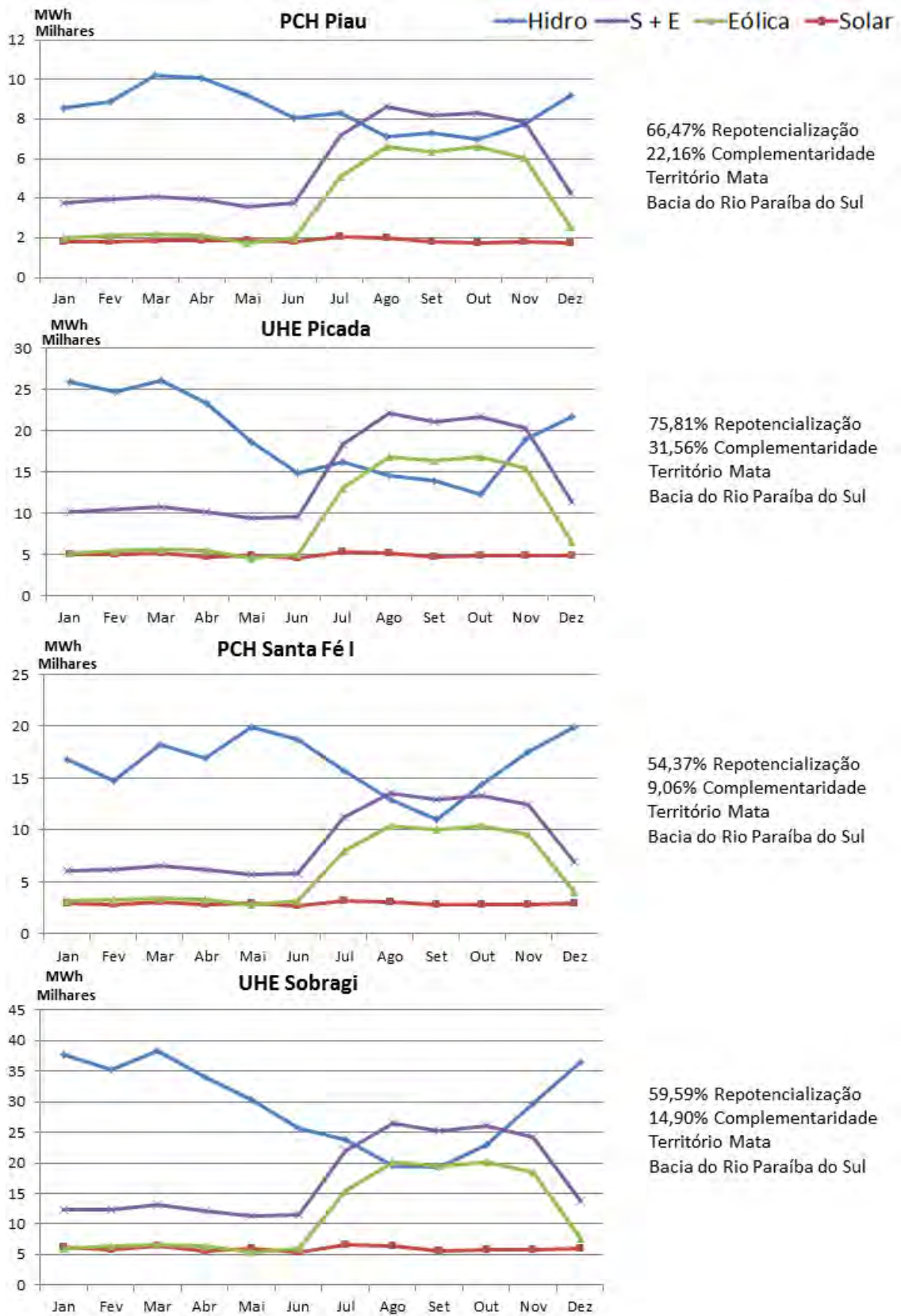
Fonte: Elaborado pelos autores





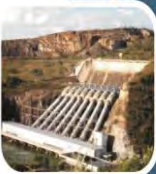
**Figura 28: Usinas analisadas**

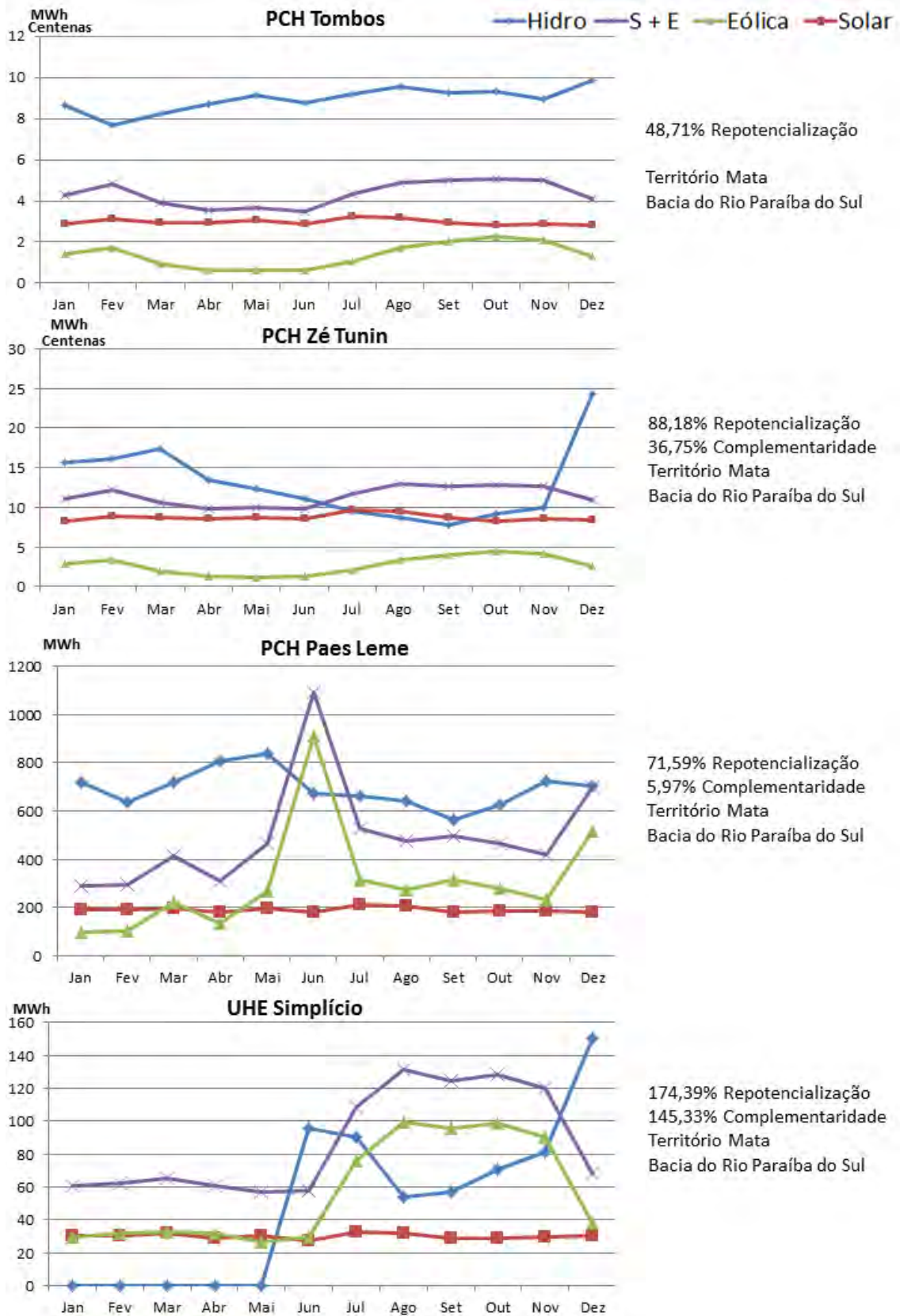
Fonte: Elaborado pelos autores



**Figura 29: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores





**Figura 30: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

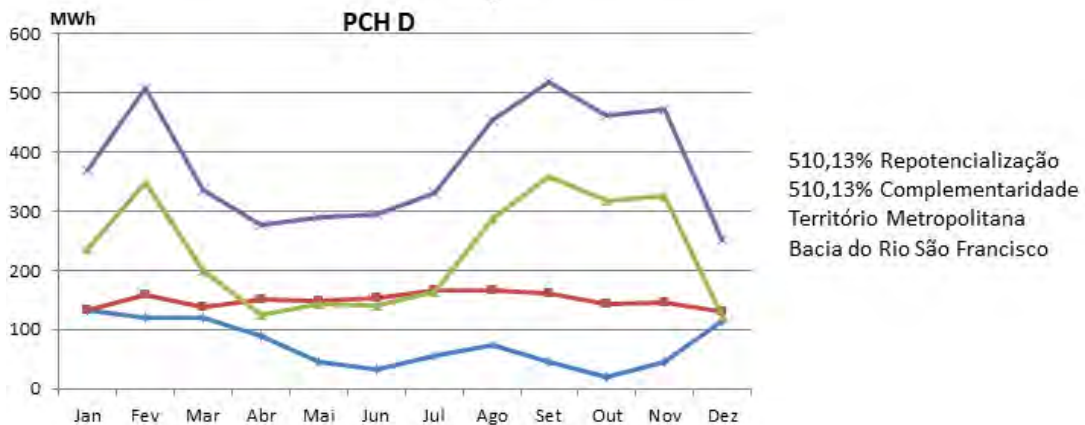
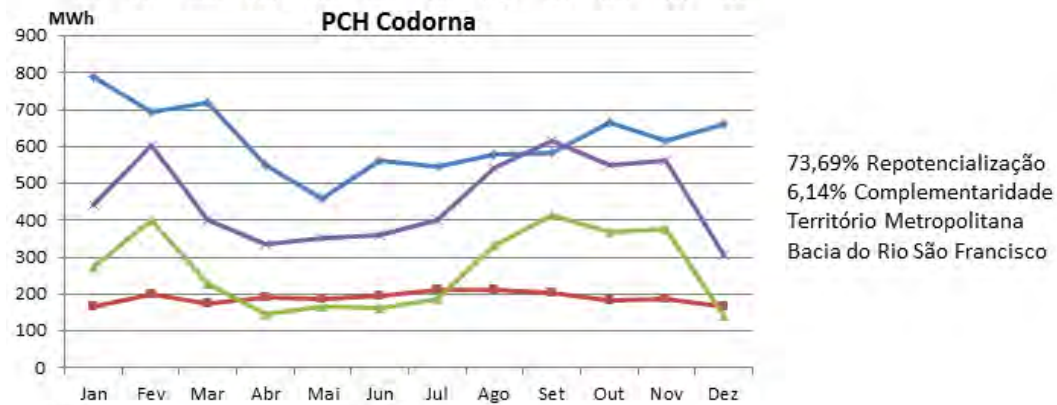
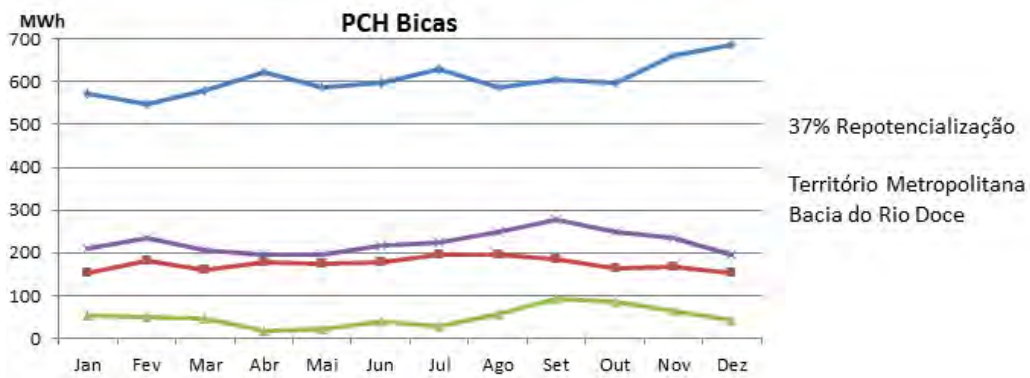
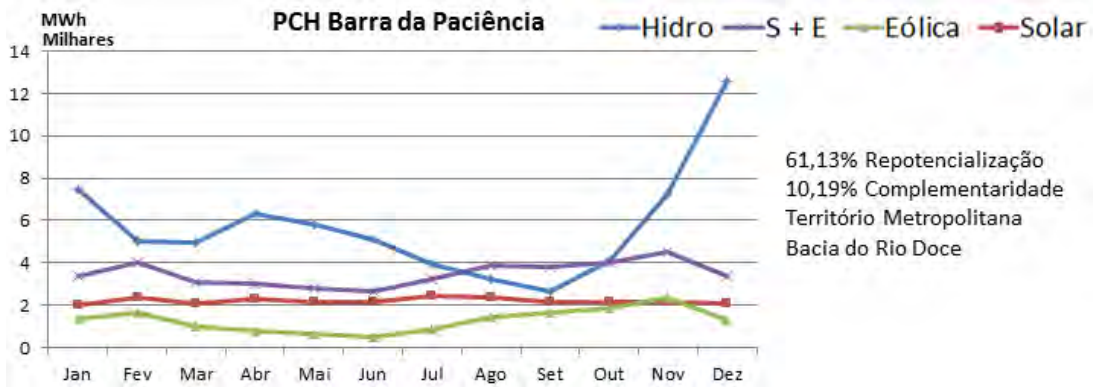


#### 4.1.5. Metropolitana

No território Metropolitano, foram analisadas 15 usinas, dentre as quais 7 apresentaram valores de complementaridade (mínimo 6,14%; máximo 510,13%) e 8 apresentaram valores de repotencialização (mínimo 1,87%; máximo 510,13%). Os casos promissores foram os das PCHs D (510,12% repotencialização e 510,12% complementaridade), Rio de Pedras (104,02% repotencialização e 69,35% complementaridade), e F (74,85% repotencialização e 12,47% complementaridade).

As fontes eólica e solar apresentam nesta região comportamentos semelhantes aos descritos anteriormente.

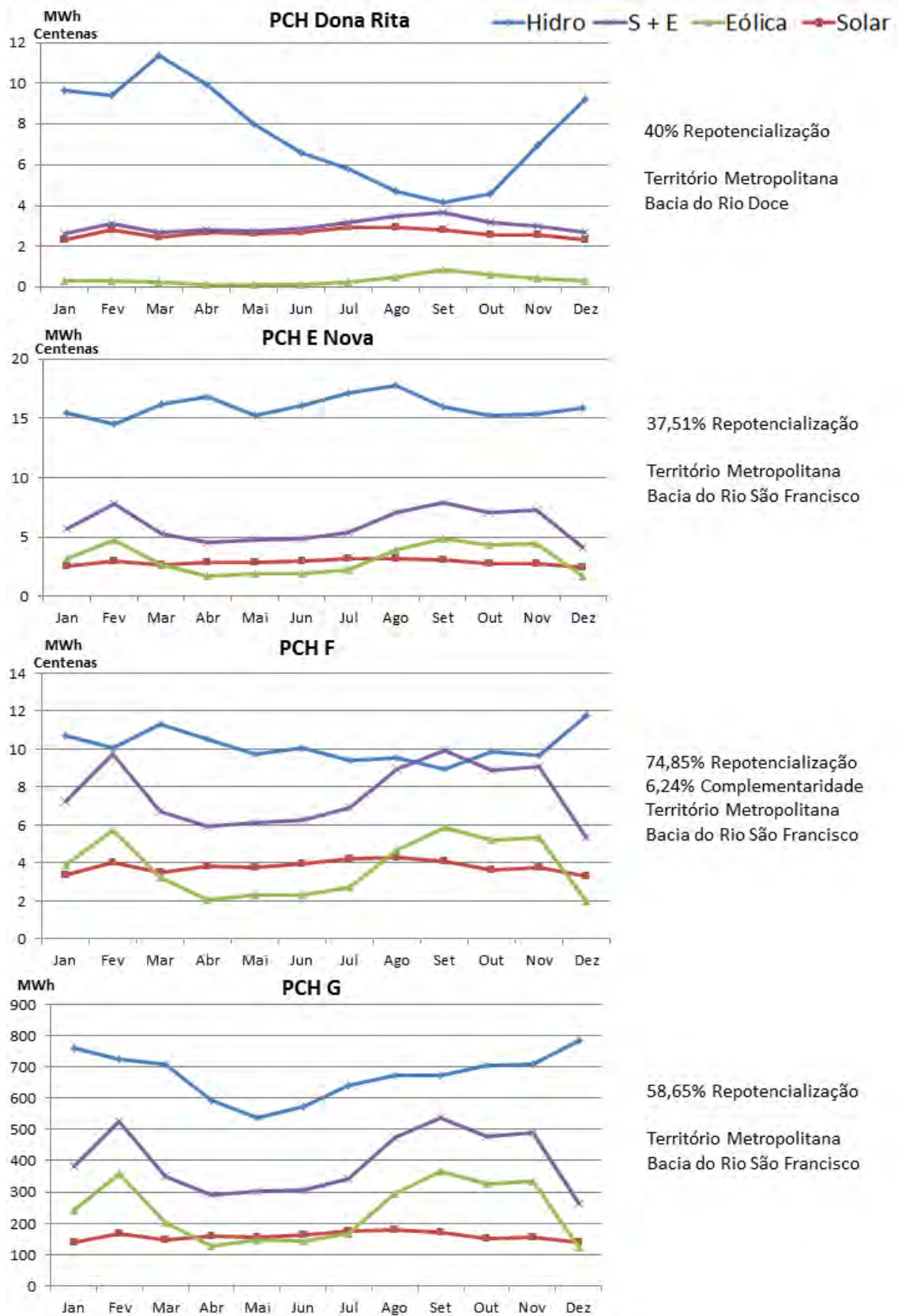




**Figura 31: Usinas analisadas**

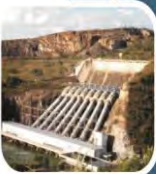
Fonte: Elaborado pelos autores





**Figura 32: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores



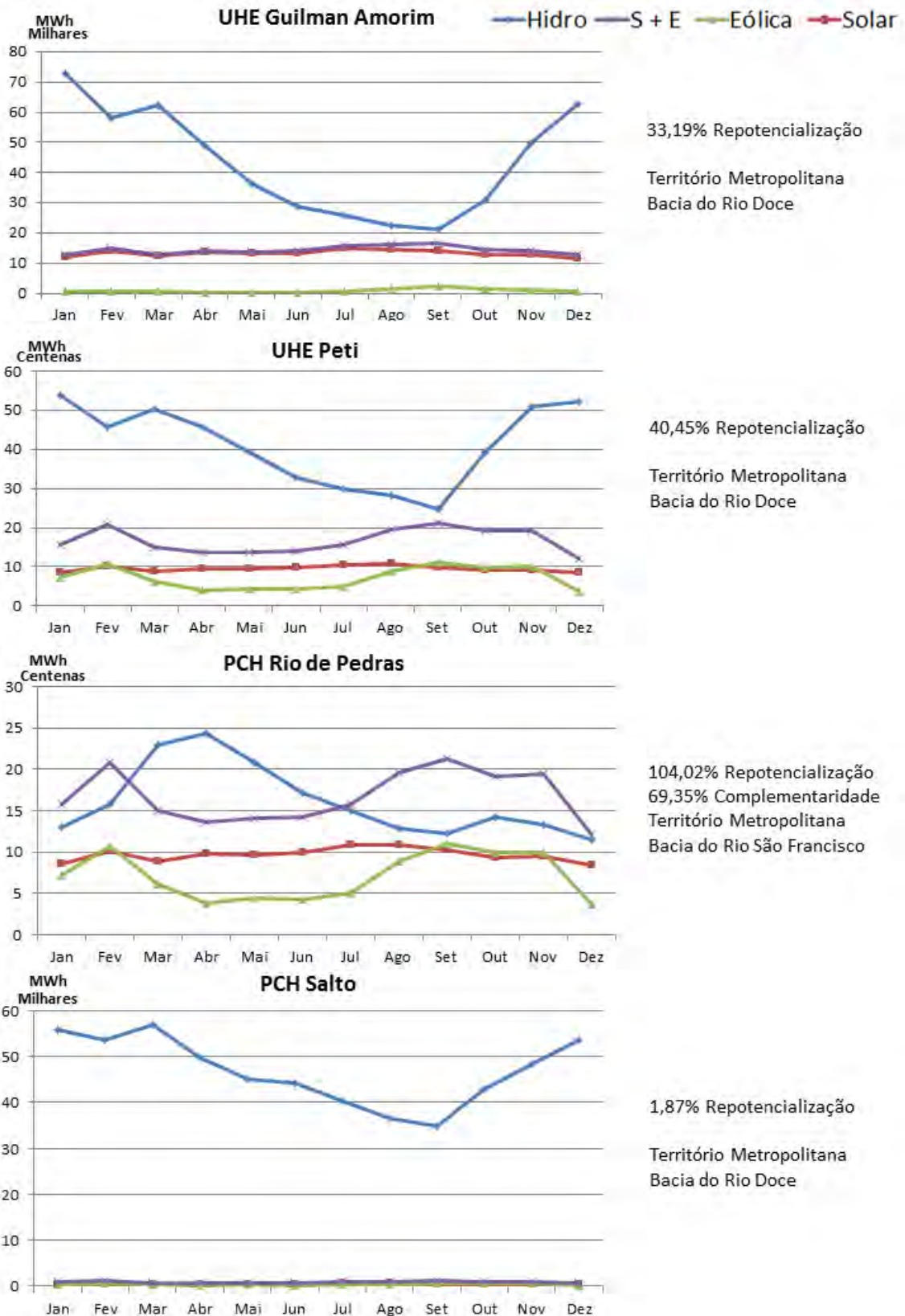
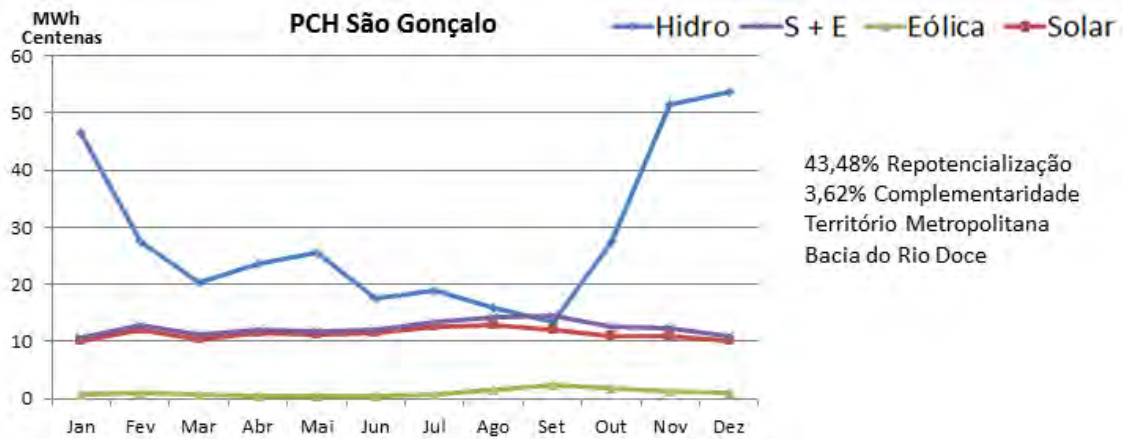
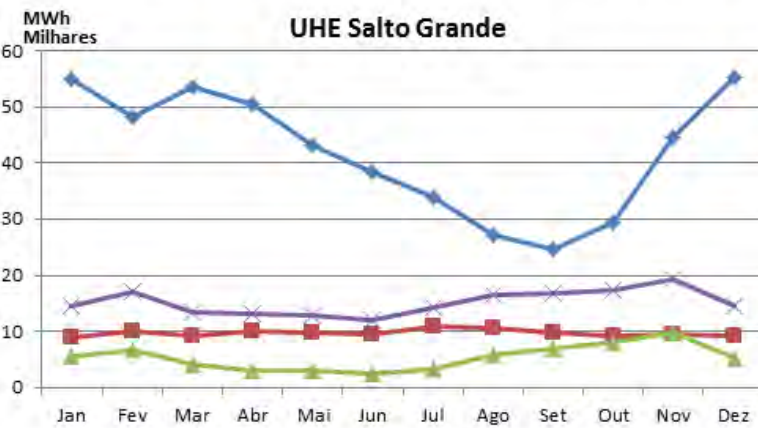


Figura 33: Usinas analisadas

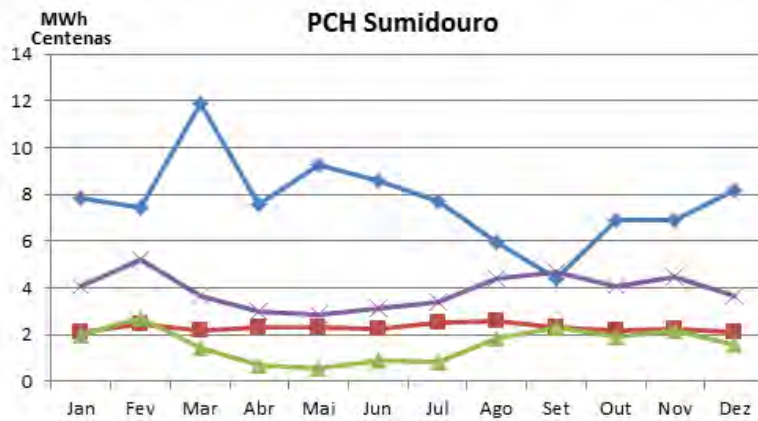
Fonte: Elaborado pelos autores



43,48% Repotencialização  
 3,62% Complementaridade  
 Território Metropolitana  
 Bacia do Rio Doce



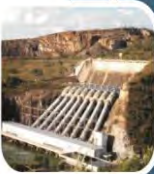
36,04 Repotencialização  
 Território Metropolitana  
 Bacia do Rio Doce



50,28% Repotencialização  
 4,19% Complementaridade  
 Território Metropolitana  
 Bacia do Rio Doce

**Figura 34: Usinas analisadas**

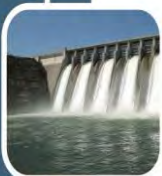
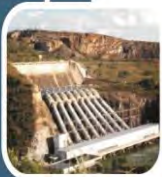
Fonte: Elaborado pelos autores

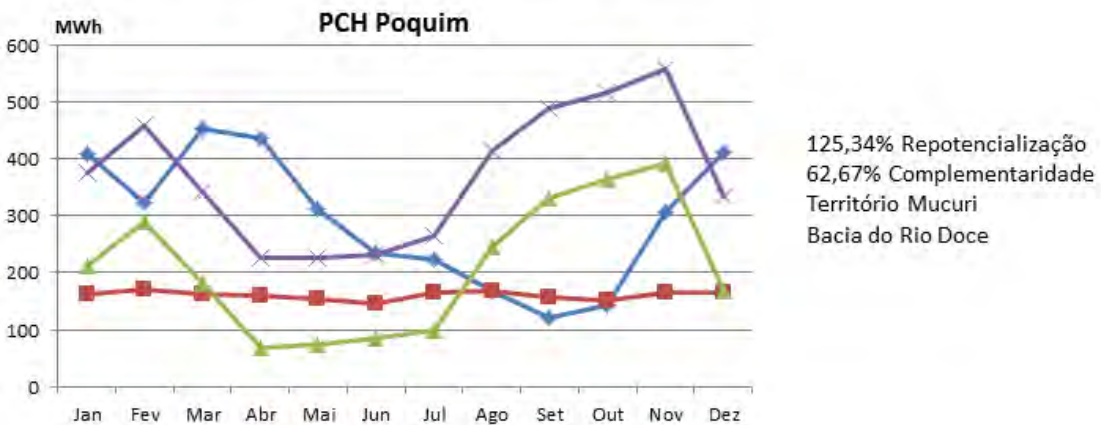
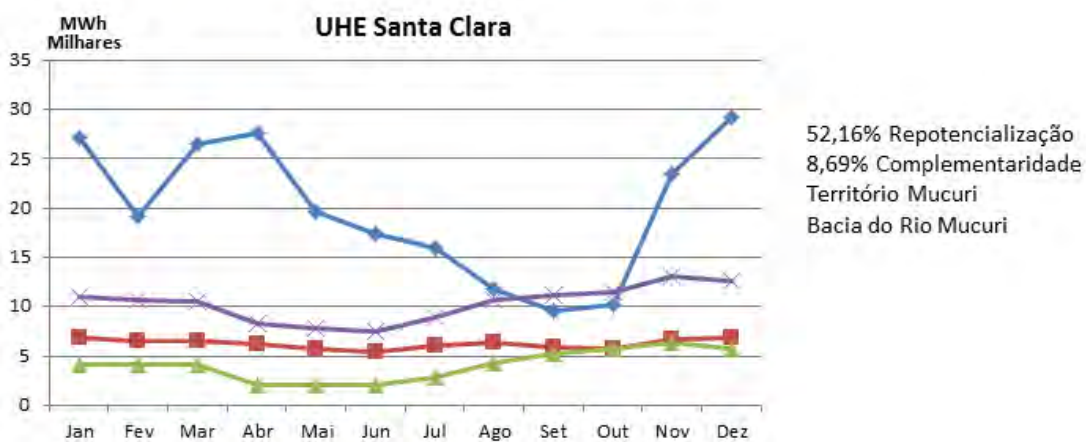
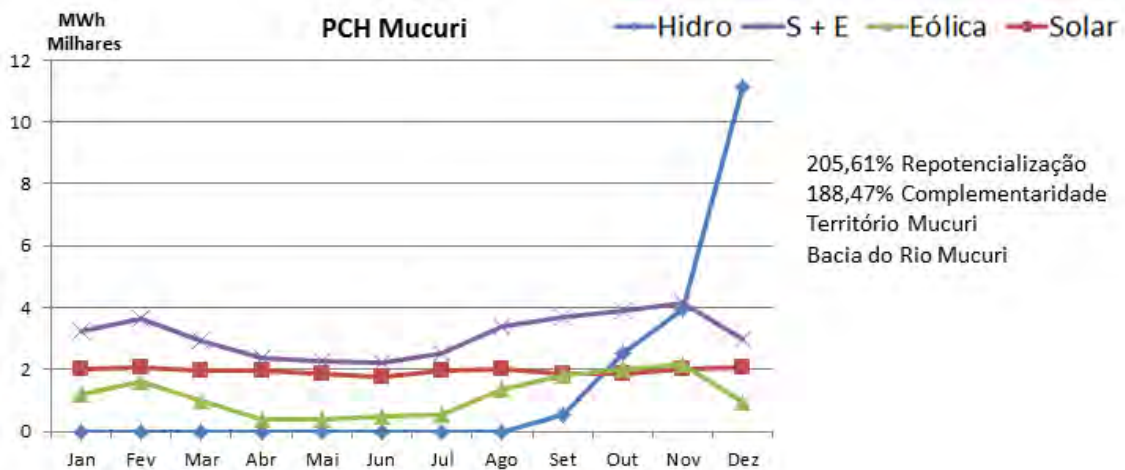




#### 4.1.6. Mucuri

No território do Mucuri foram analisadas 3 usinas, onde todas apresentaram valores de complementaridade diferentes de zero (mínimo 8,69%; máximo 188,47%). O caso potencialmente mais promissor é o da PCH Mucuri, contudo, podem-se observar valores nulos na geração hidráulica, o que possivelmente está associado a falhas nos registros de medição. Desta forma, o caso mais promissor pode ser apontado como o da PCH Poquim, com 125,34% de repotencialização e 62,67% de complementaridade. O perfil de geração desta usina é bastante semelhante aos perfis desejados em casos de complementaridade da geração por meio de fontes renováveis, onde se observa que os valores de geração das fontes auxiliares são menores que os valores máximos da fonte principal e menores ou iguais aos seus mínimos.





**Figura 35: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

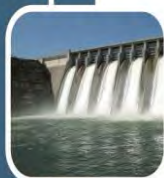
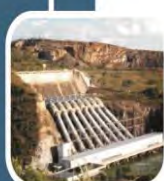
#### 4.1.7. Noroeste

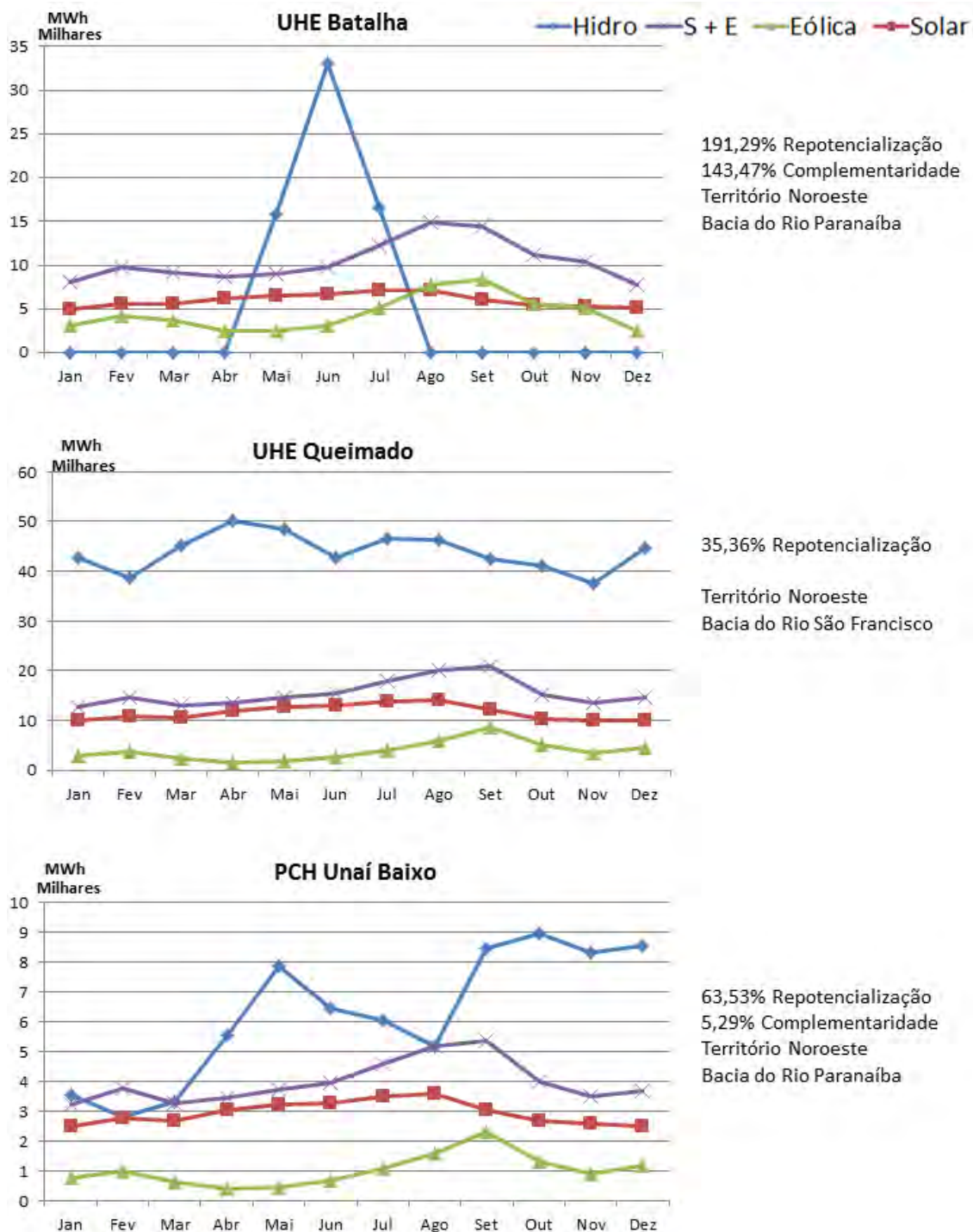
No território Noroeste foram analisadas 3 usinas, onde duas apresentaram valores de complementaridade diferentes de zero e uma





apresentou valor de repotencialização. A UHE Batalha, de forma semelhante a PCH Mucuri, possui valores de geração associados a hidroeletricidade iguais a zero, o que possivelmente ocorreu devido a falhas no registro das medições de geração. Observando-se as três usinas pode-se perceber que a geração híbrida apresenta um perfil bastante semelhante em todos os casos, com maiores disponibilidades nos meses de julho-agosto-setembro. Tal variação esta associada a parcela de geração eólica, que novamente apresenta maiores variações, quando comparada a geração solar, que mostra-se praticamente constante ao longo do ano.





**Figura 36: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

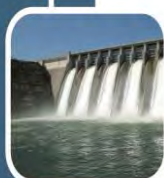
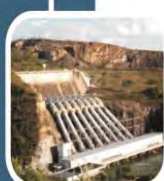
#### 4.1.8. Norte

No Território Norte foram analisadas 3 usinas, onde todas apresentaram valores de complementaridade diferentes de zero (mínimo 19,25%; máximo

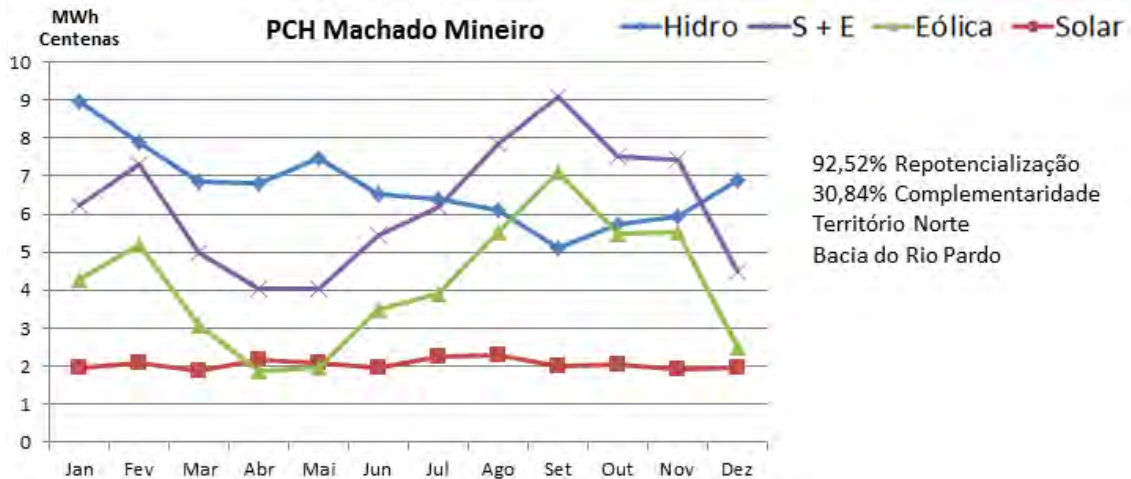




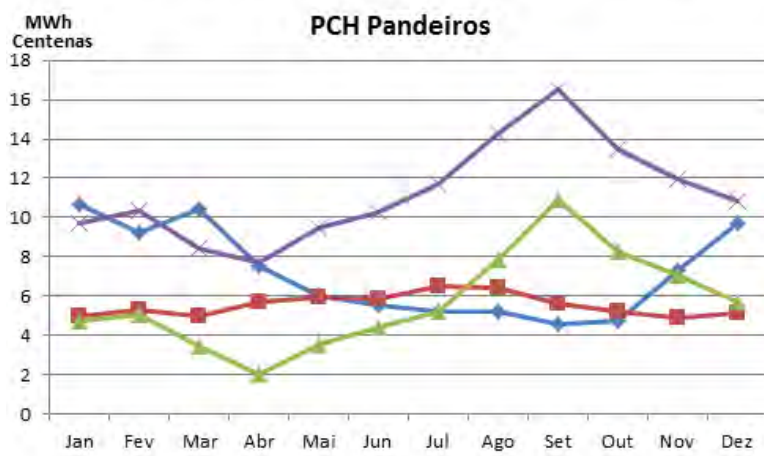
130,38%). O caso mais promissor foi o da PCH Pandeiros com 156,46% de repotencialização e 130,38% de complementaridade. Os perfis da geração híbrida nesta região são bastante semelhantes, verificando-se a maior disponibilidade dos recursos renováveis nos meses de julho-agosto-setembro-outubro-novembro. Novamente, esta variação está associada ao regime do recurso eólico, uma vez que a parcela de geração associada à fonte solar possui poucas variações.



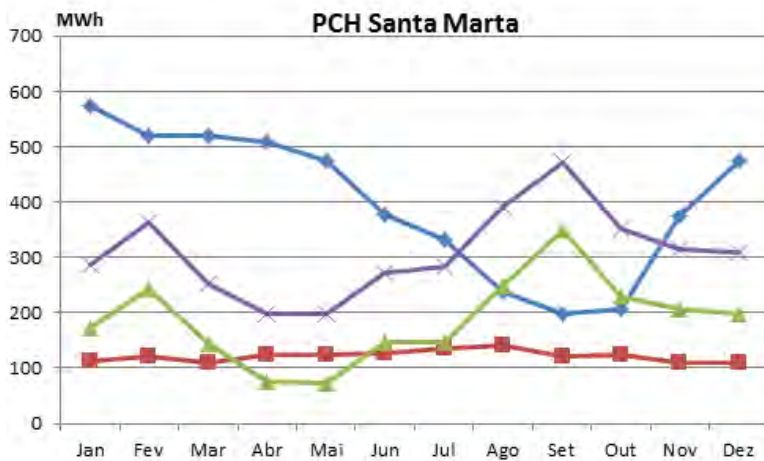
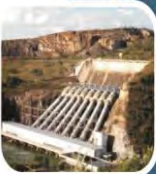




92,52% Repotencialização  
 30,84% Complementaridade  
 Território Norte  
 Bacia do Rio Pardo



156,46% Repotencialização  
 130,38% Complementaridade  
 Território Norte  
 Bacia do Rio São Francisco



77% Repotencialização  
 19,25% Complementaridade  
 Território Norte  
 Bacia do Rio Jequitinhonha



**Figura 37: Usinas analisadas**

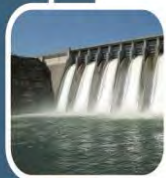
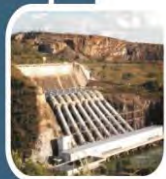
Fonte: Elaborado pelos autores

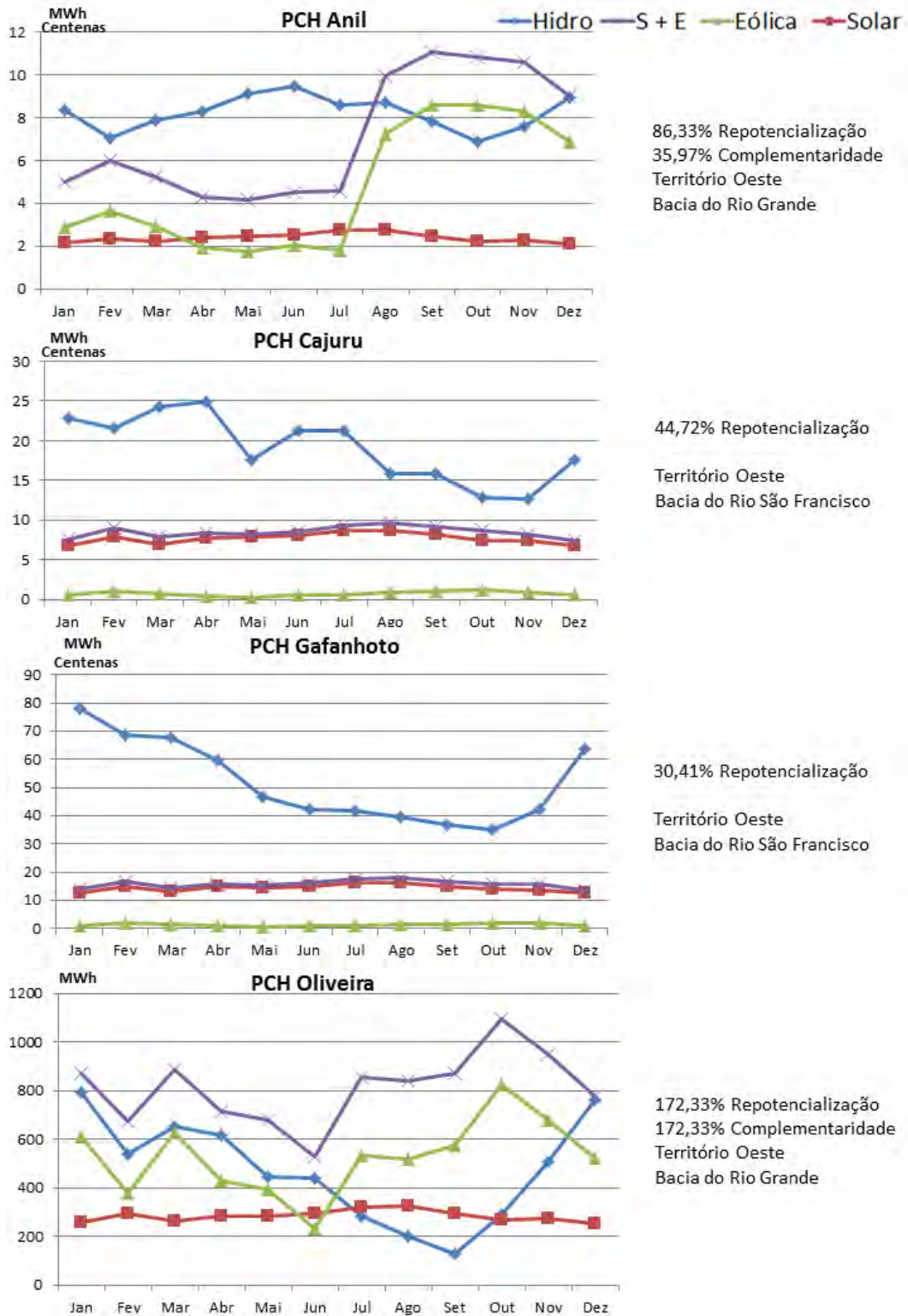




#### 4.1.9. Oeste

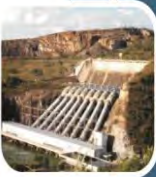
No Território Oeste foram analisadas 4 usinas, onde 2 apresentaram valores de complementaridade diferentes de zero e 2 apresentaram valores de repotencialização. Os casos mais promissores foram os das PCHs Oliveira (172,33% de repotencialização e complementaridade) e Anil (86,33% repotencialização e 35,97% complementaridade).





**Figura 38: Usinas analisadas**

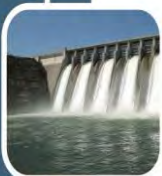
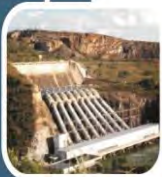
Fonte: Elaborado pelos autores

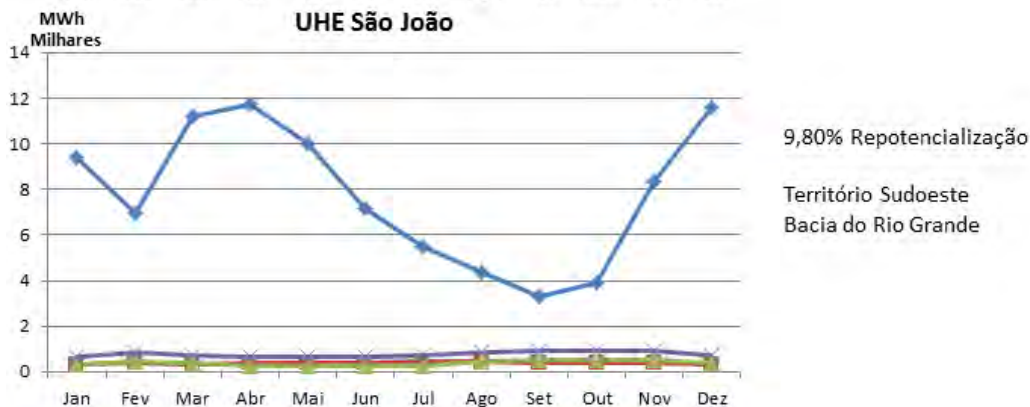
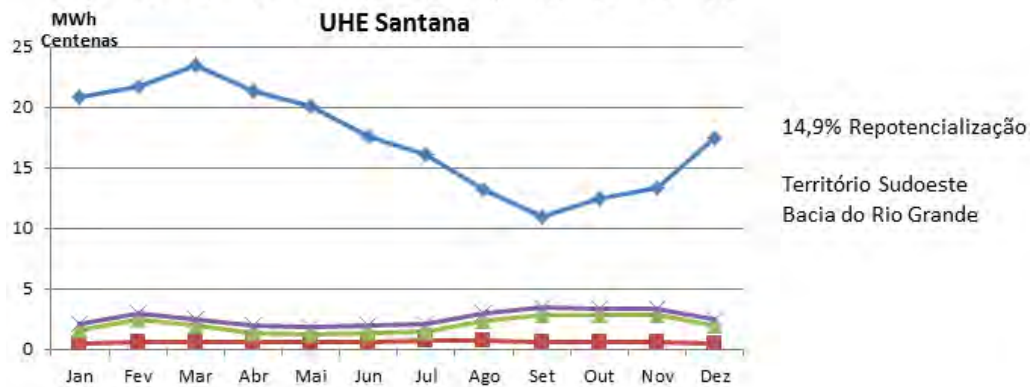
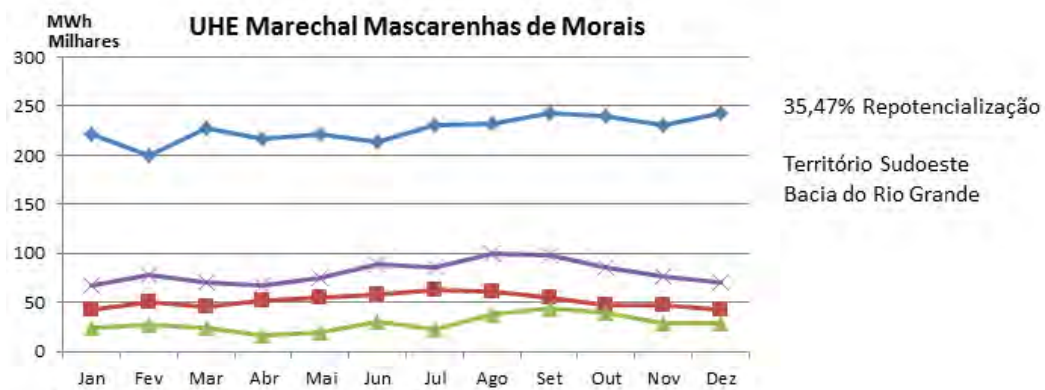
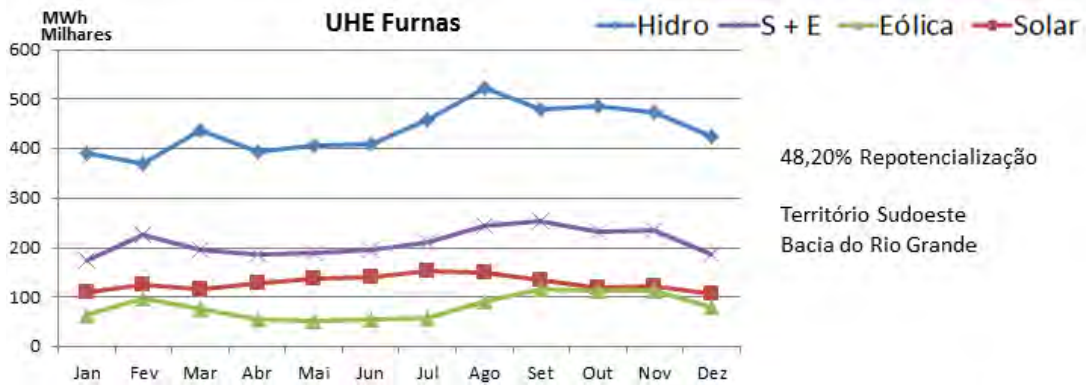




#### 4.1.10. Sudoeste

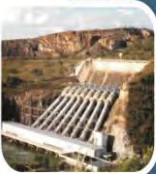
No território Sudoeste foram analisadas 4 usinas, onde nenhuma delas apresentou valores de complementaridade, apresentando todas, valores de repotencialização (mínimo 9,80%; máximo 48,20%). Ressalta-se que, para esta região, todas as usinas analisadas foram do tipo UHE, que possuem altos valores de potência instalada, o que explica a não ocorrência de valores de complementaridade. Contudo, os valores de repotencialização de 35,47% (UHE Mascarenhas de Moraes) e 48,20% (UHE Furnas) podem ser considerados valores promissores, quando analisados sob a ótica dos altos valores de geração que são realizados por tais UHEs.





**Figura 39: Usinas analisadas**

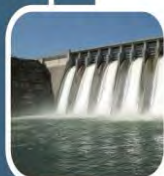
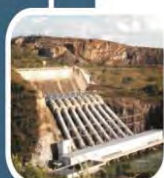
Fonte: Elaborado pelos autores

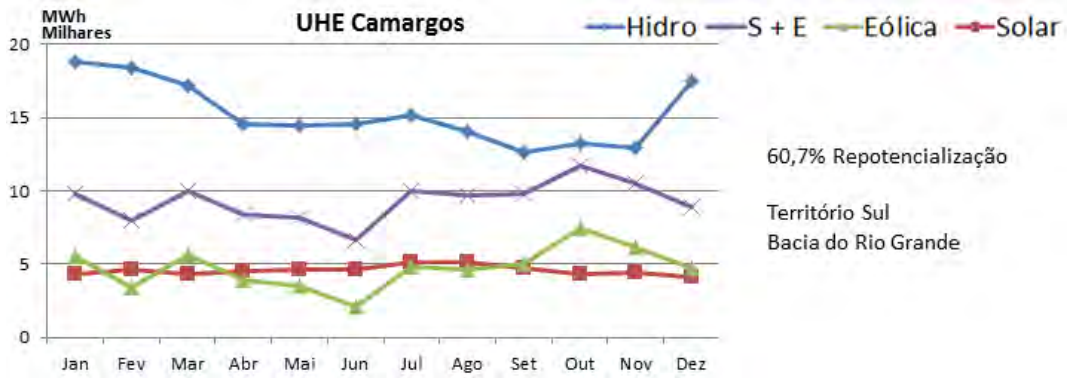




#### 4.1.11. Sul

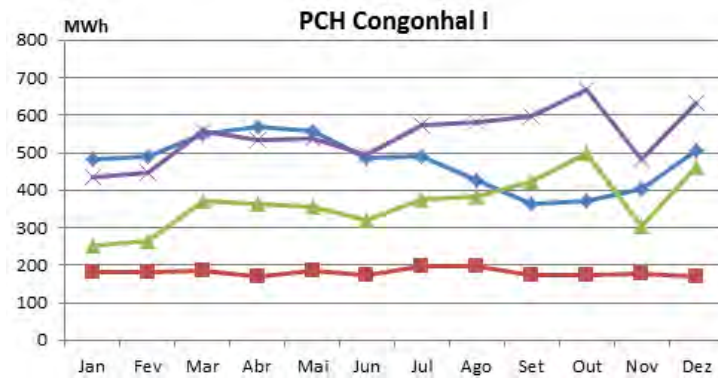
No Território Sul foram analisadas 10 usinas, onde 5 apresentaram valores de complementaridade (mínimo 7,71%; máximo 76,66%) e as demais, repotencialização (mínimo 29,59%; máximo 114,99%). Os casos mais promissores são os da PCH Congonhal I e Xicão, com 114,99% e 91,03% de repotencialização e 76,66% e 37,93% de complementaridade, respectivamente.





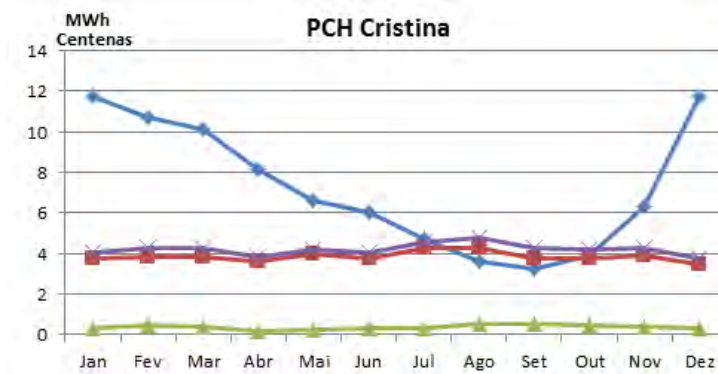
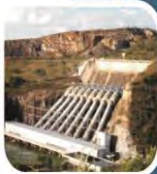
60,7% Repotencialização

Território Sul  
 Bacia do Rio Grande



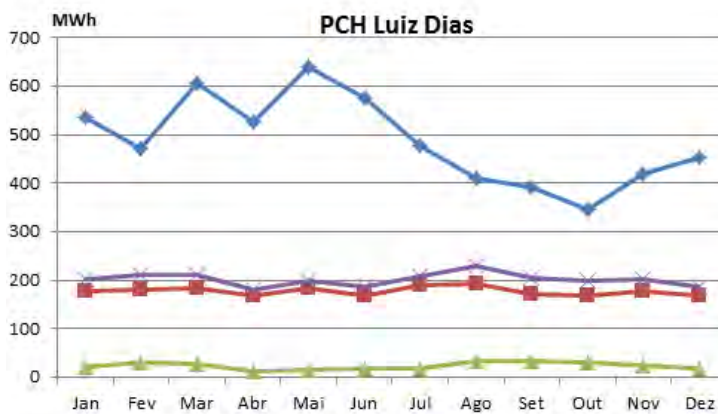
114,99% Repotencialização  
 76,66% Complementaridade

Território Sul  
 Bacia do Rio Grande



58,29% Repotencialização  
 14,57% Complementaridade

Território Sul  
 Bacia do Rio Grande



41,39% Repotencialização

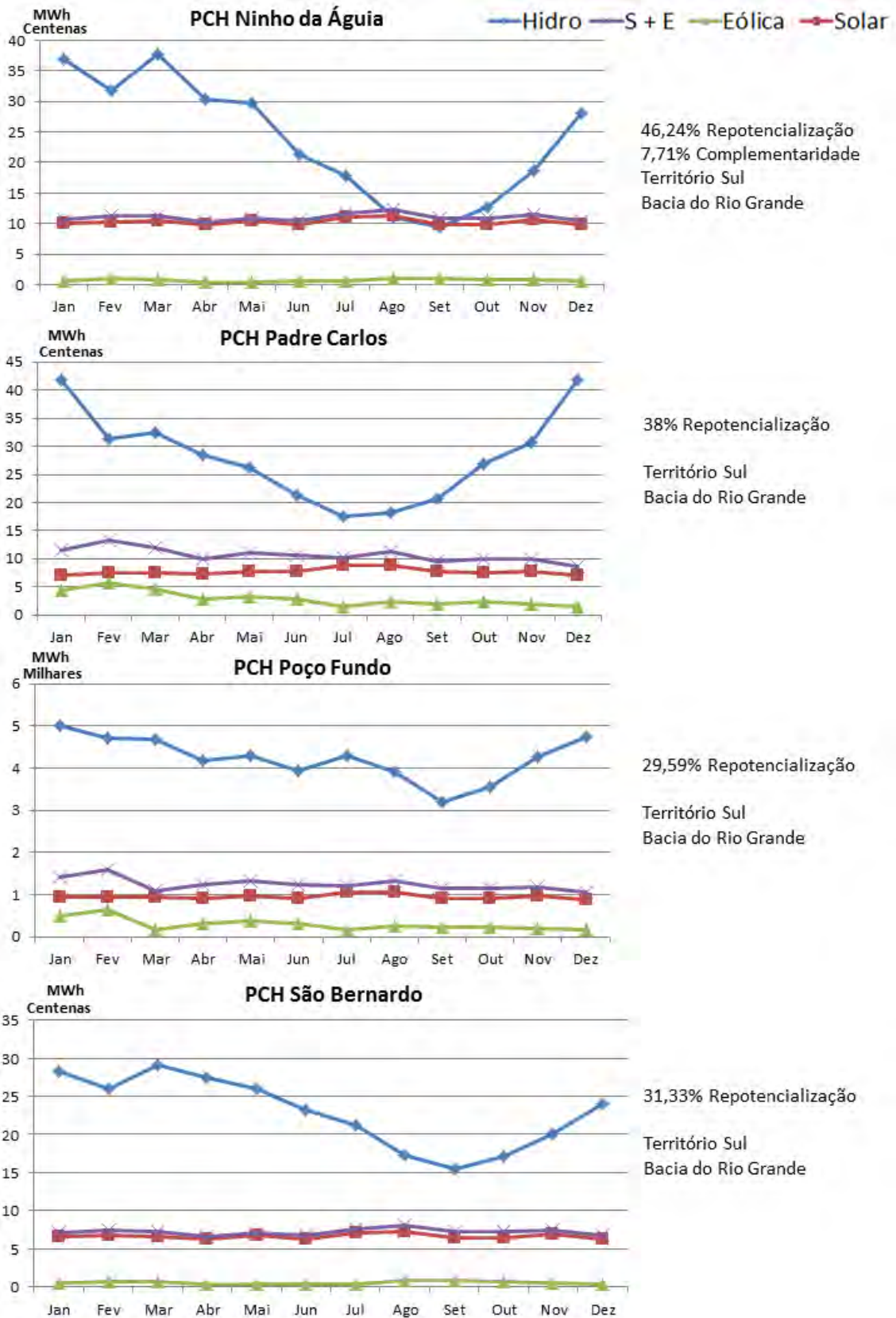
Território Sul  
 Bacia do Rio Grande



**Figura 40: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

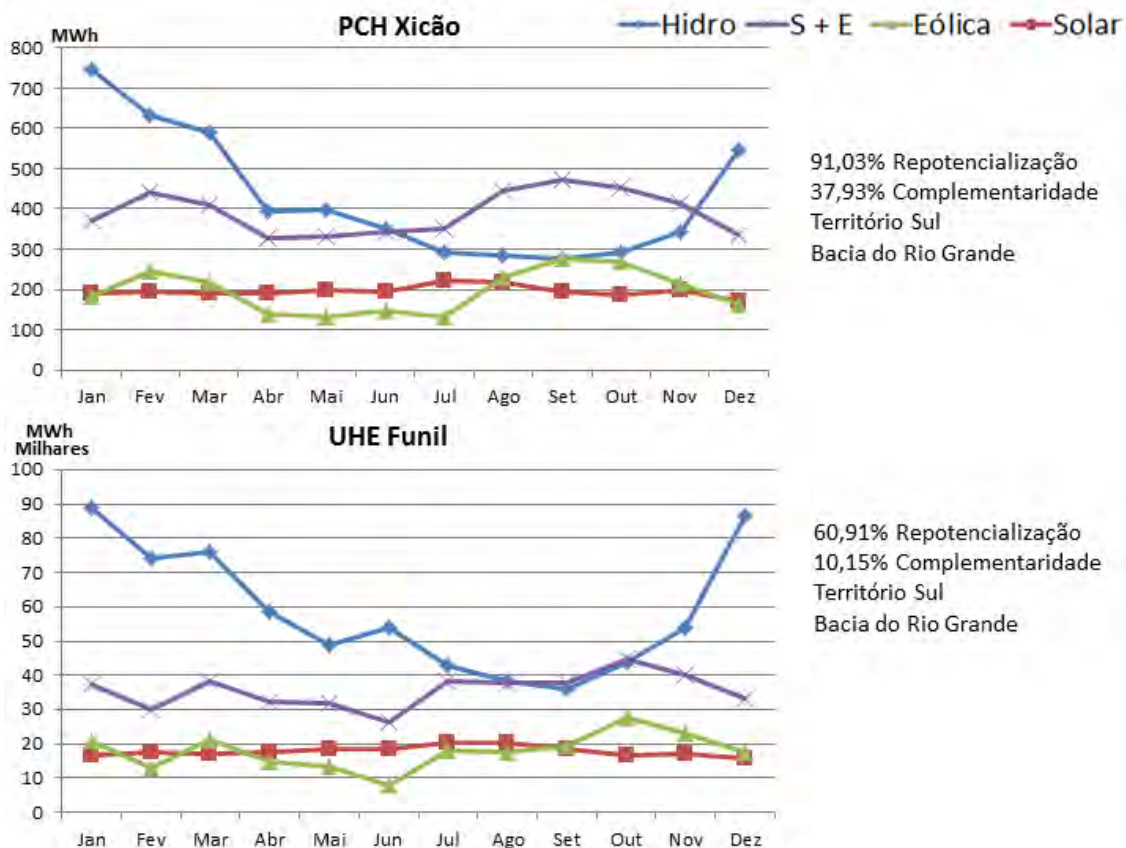




**Figura 41: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores





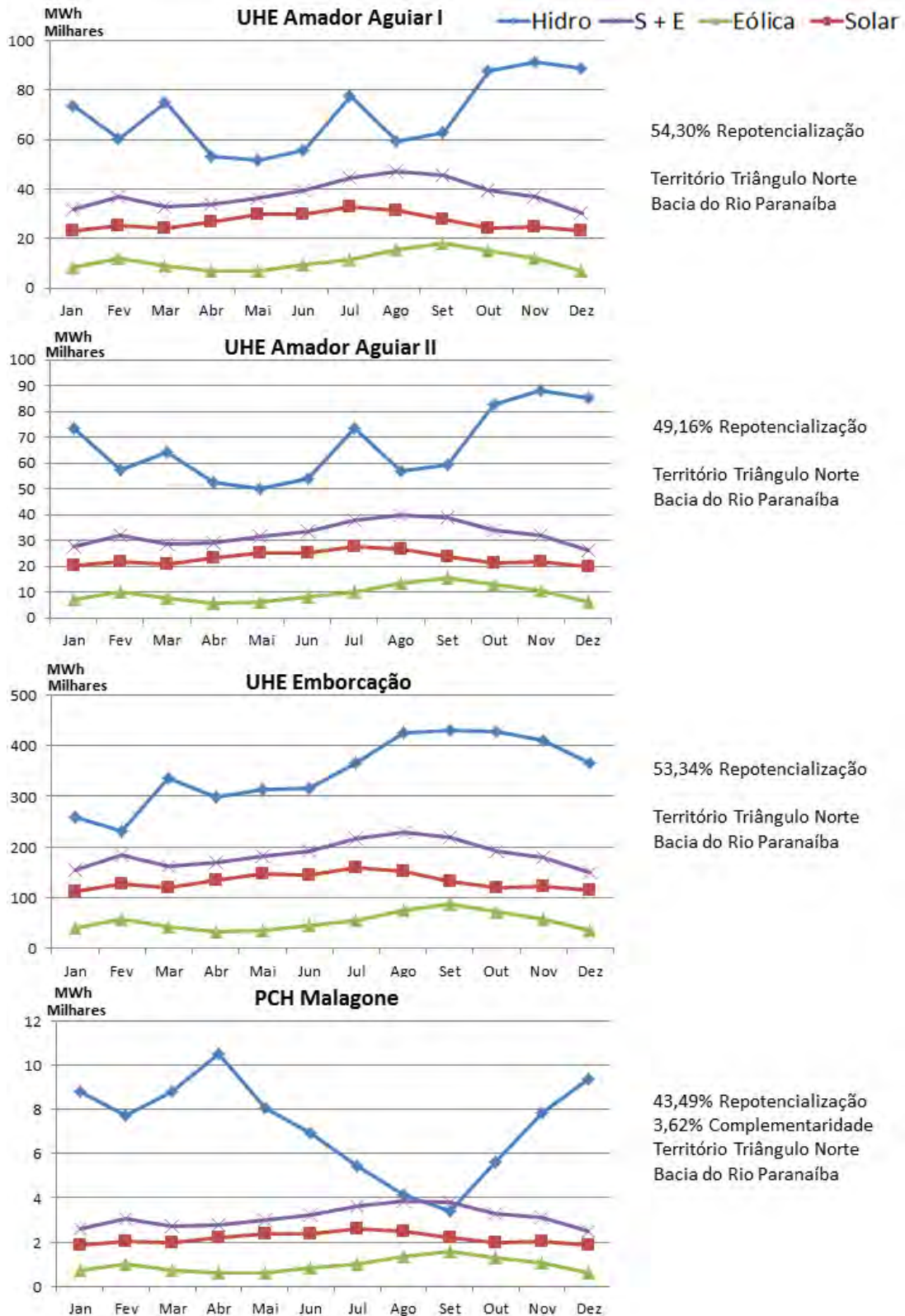
**Figura 42: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

#### 4.1.12. Triângulo Norte

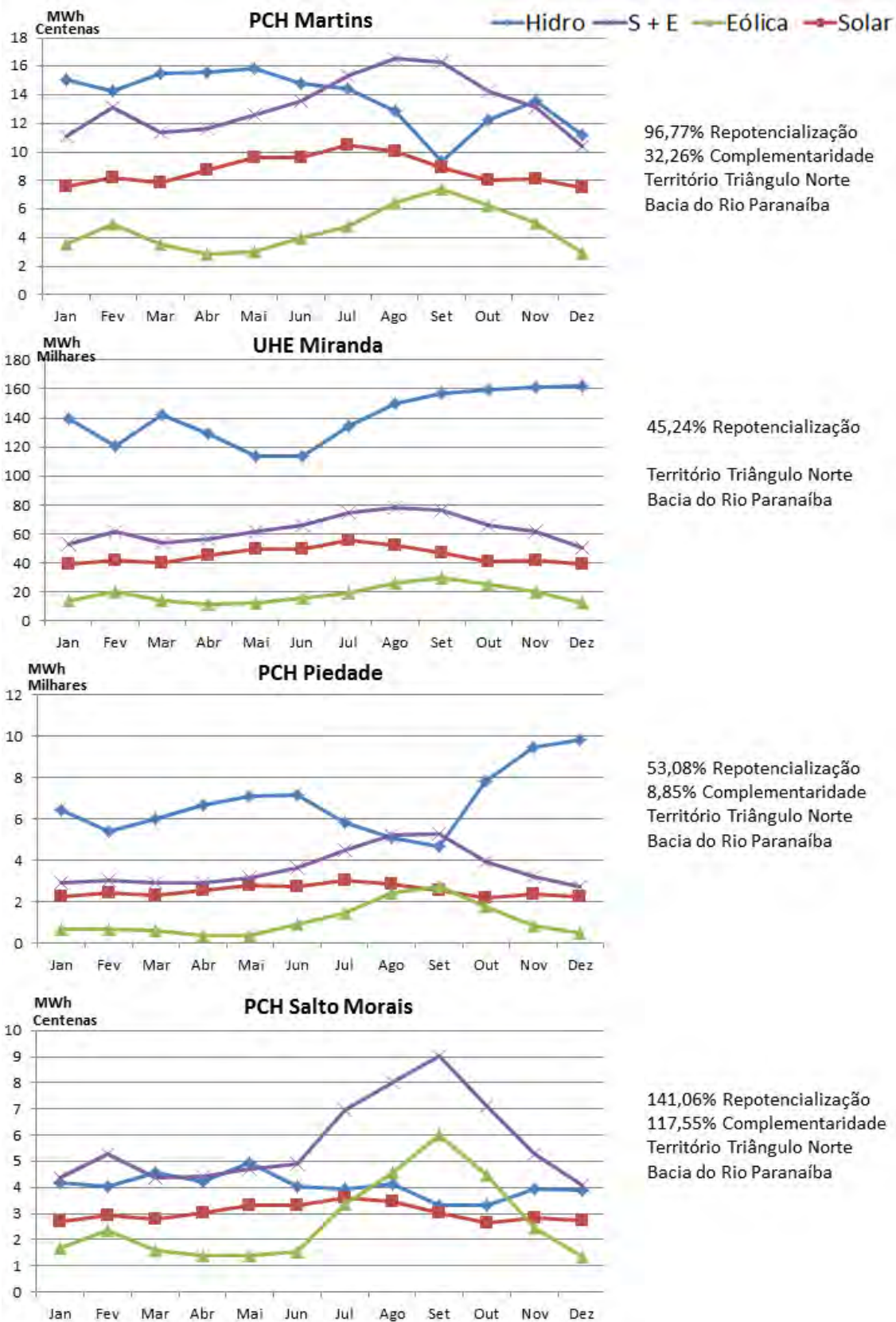
No Território Triângulo Norte foram analisadas 9 usinas, onde 4 apresentaram valores de complementaridade (mínimo 3,62%; máximo 117,55%) e as demais, repotencialização (mínimo 41,78%; máximo 141,06%). Os casos mais promissores foram os das PCHs Martins e Salto Morais, com 32,26% e 117,55% de complementaridade e 96,77% e 141,06% de repotencialização, respectivamente.





**Figura 43: Usinas analisadas**

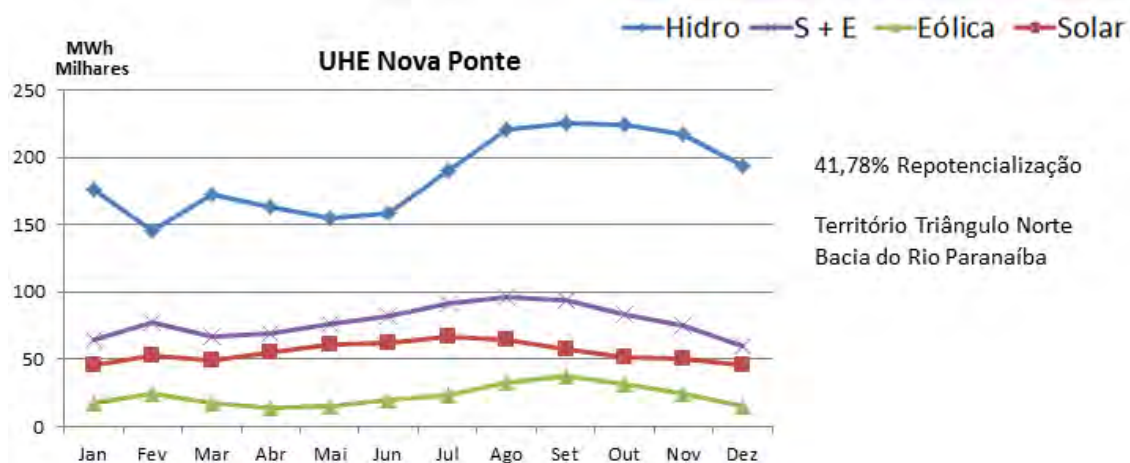
Fonte: Elaborado pelos autores



**Figura 44: Usinas analisadas**

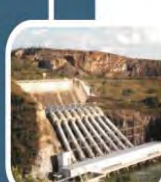
Fonte: Elaborado pelos autores





**Figura 45: Usinas analisadas**

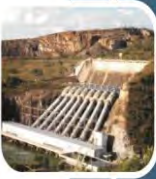
Fonte: Elaborado pelos autores

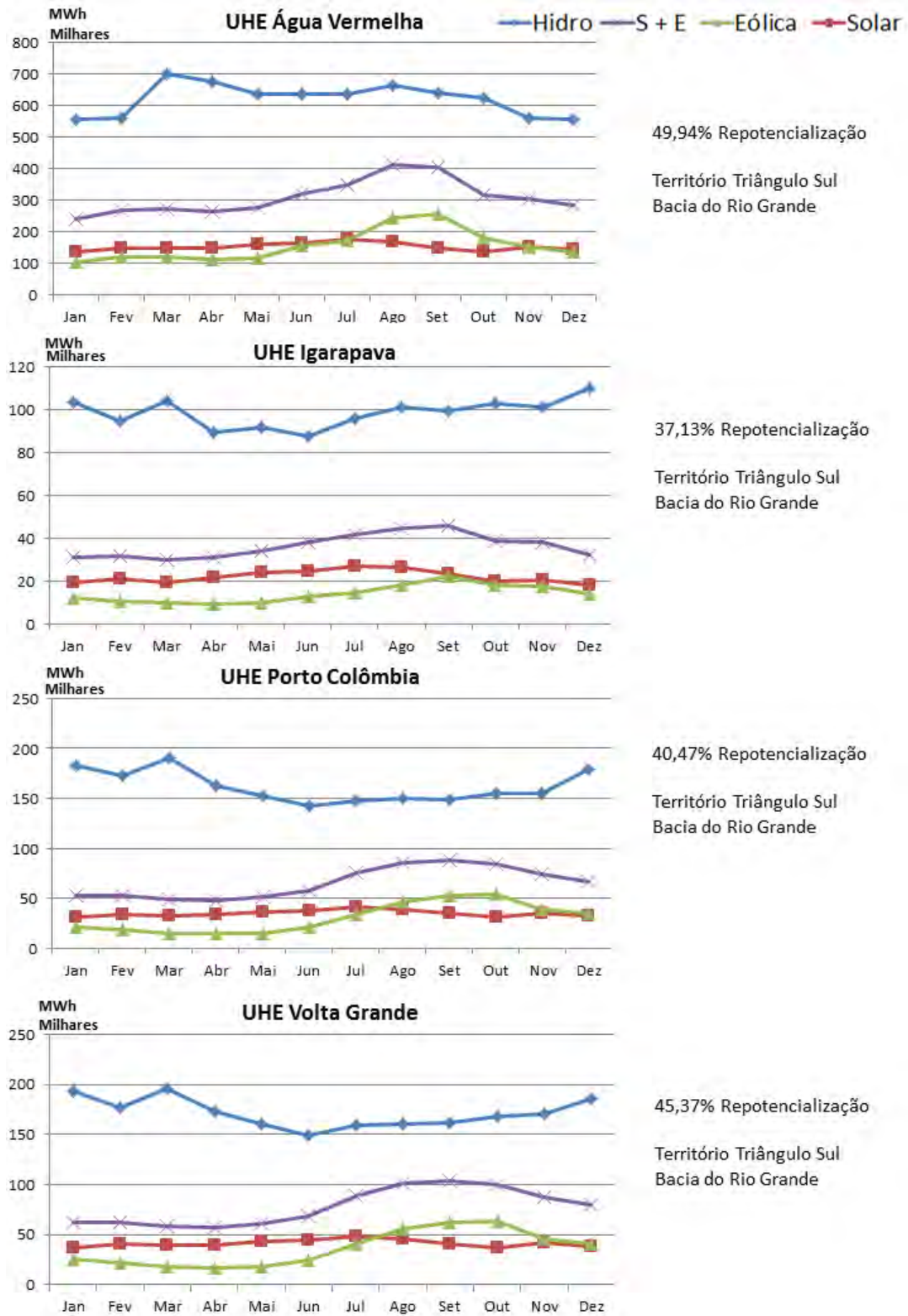




#### 4.1.13. *Triângulo Sul*

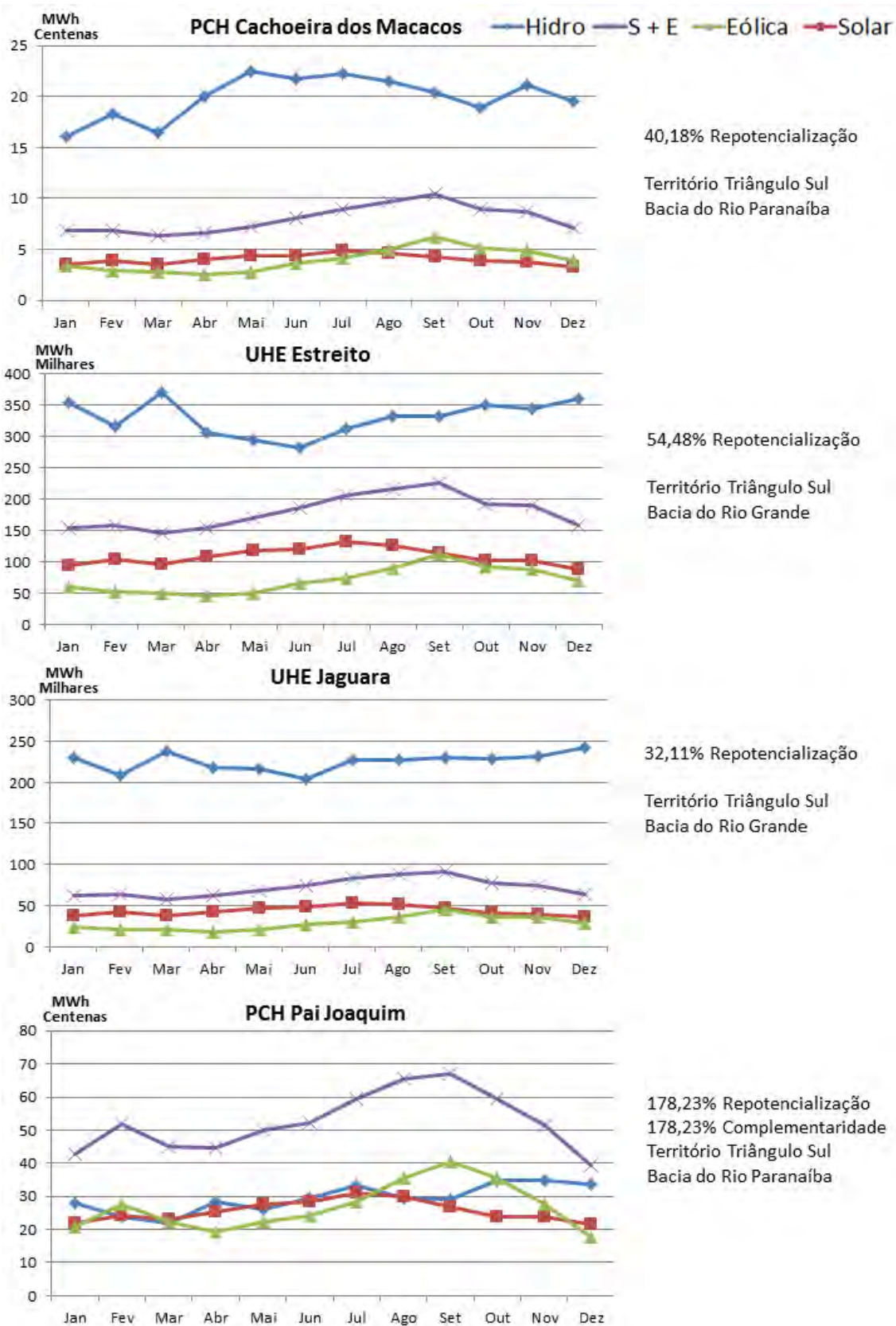
No Território Triângulo Sul foram analisadas 8 usinas, onde uma apresentou valor de complementaridade e as demais, repotencialização (mínimo 32,11%; máximo 178,23%). A usina que apresentou complementaridade foi a PCH Pai Joaquim, com 178,23% de complementaridade e repotencialização. Novamente, trata-se de uma região com prevalência de usinas do tipo UHE, o que explica o melhor desempenho em termos de repotencialização.





**Figura 46: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores



**Figura 47: Usinas analisadas**

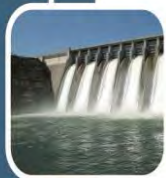
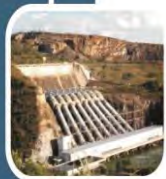
Fonte: Elaborado pelos autores



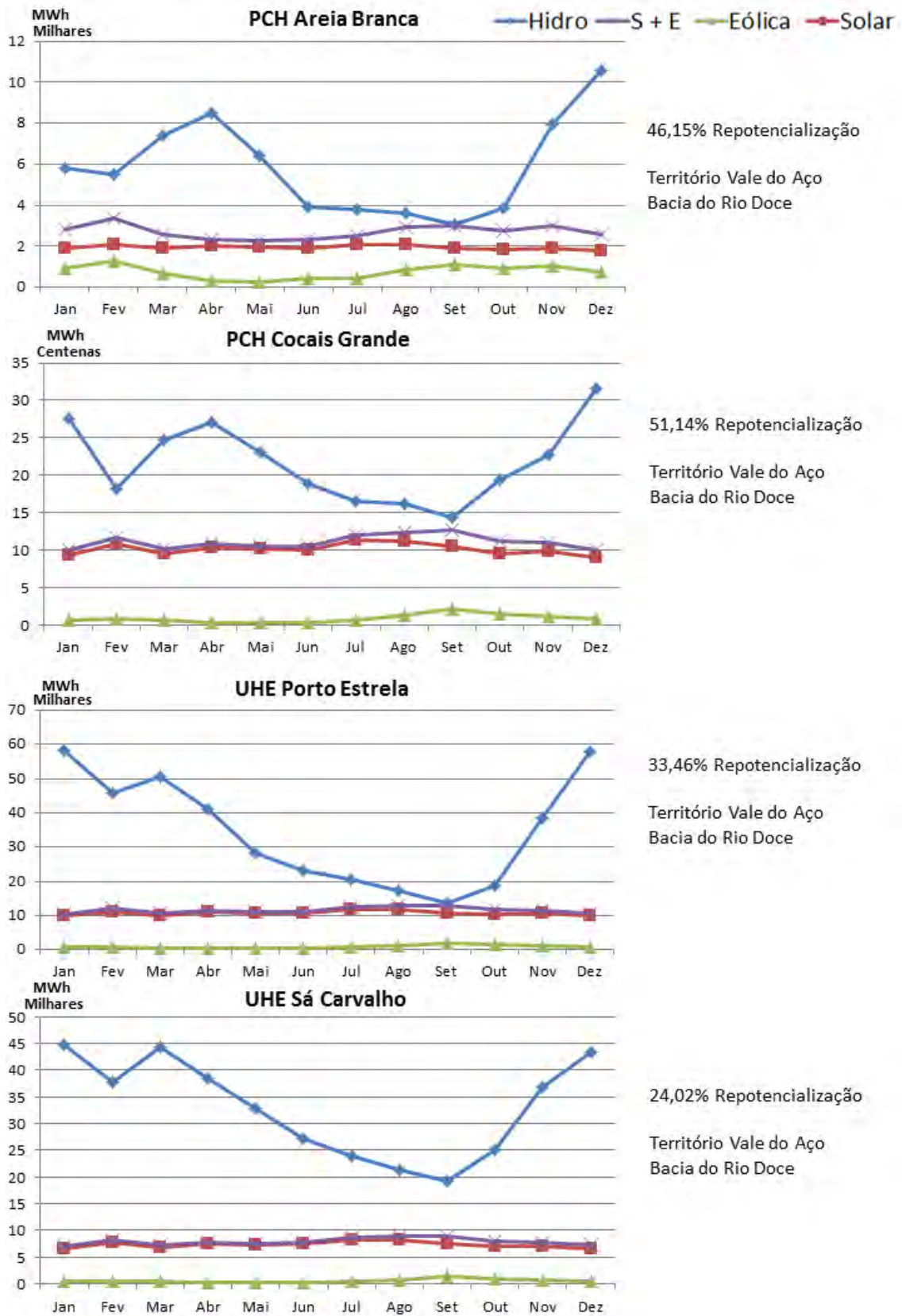


#### 4.1.14. Vale do Aço

No Território do Vale do Aço foram analisadas 4 usinas, onde todas apresentaram valores de repotencialização (mínimo 24,02%; máximo 51,14%).

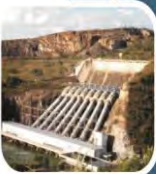






**Figura 48: Usinas analisadas**

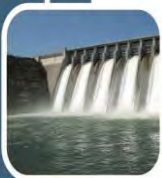
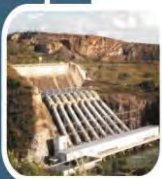
Fonte: Elaborado pelos autores

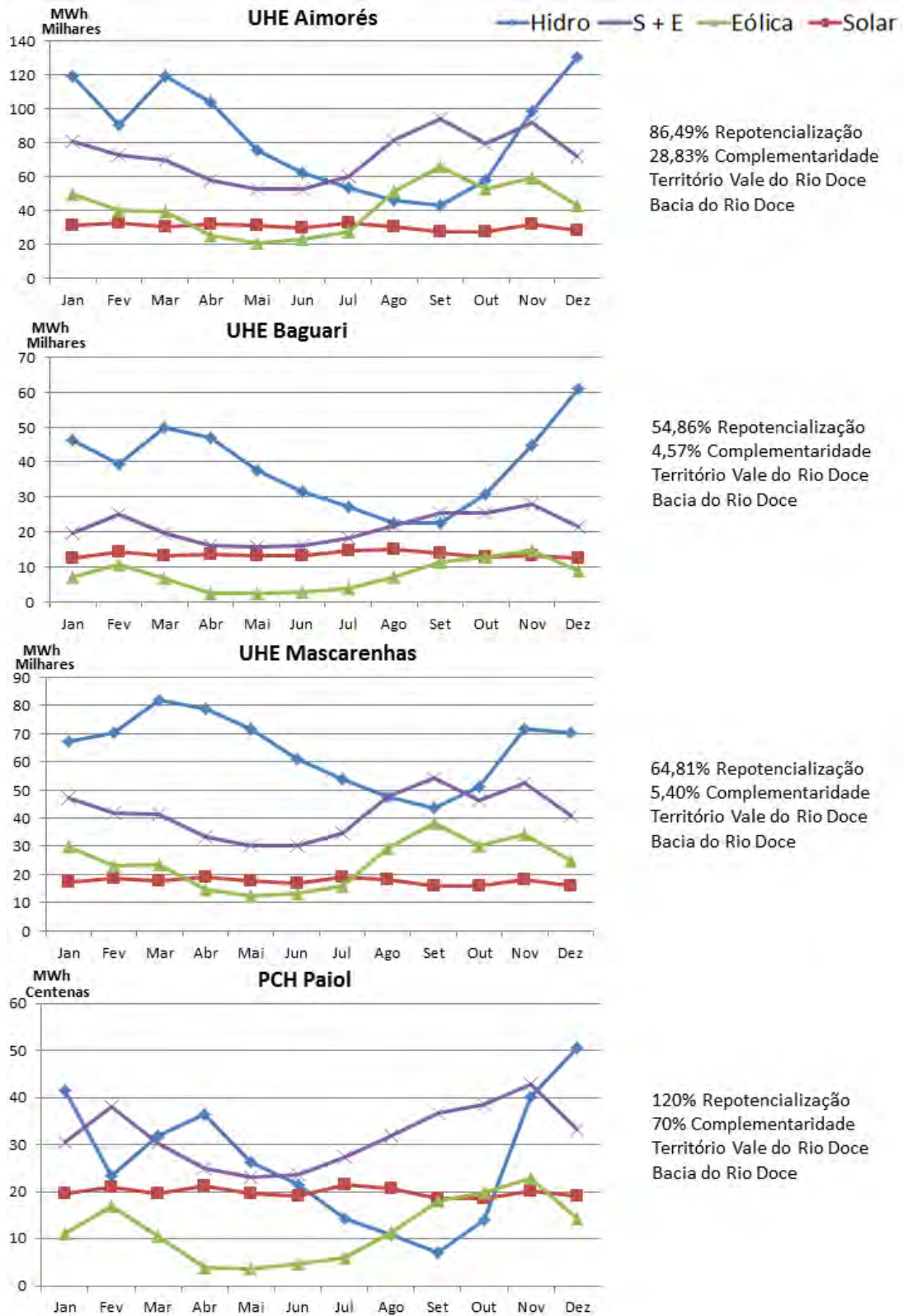




#### 4.1.15. Vale do Rio Doce

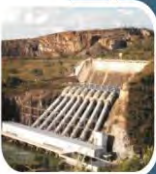
No Território do Vale do Rio Doce foram analisadas 7 usinas, onde 6 apresentaram valor de complementaridade (mínimo 4,57%; máximo 70%) e uma, repotencialização (mínimo 7,30%; máximo 120%). O caso mais promissor foi o da PCH Paiol com 70% de complementaridade e 120% de repotencialização.

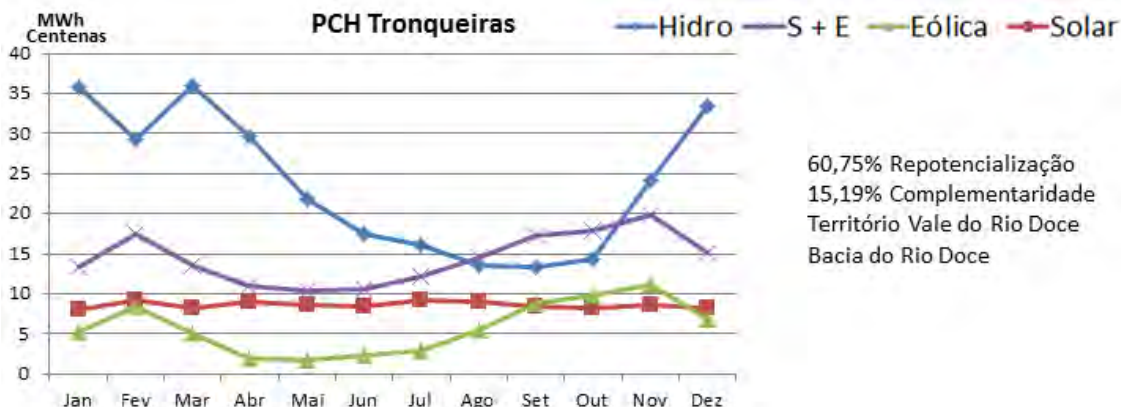




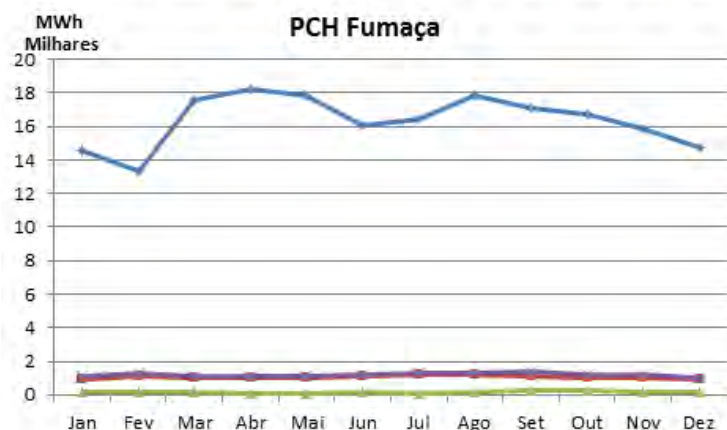
**Figura 49: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

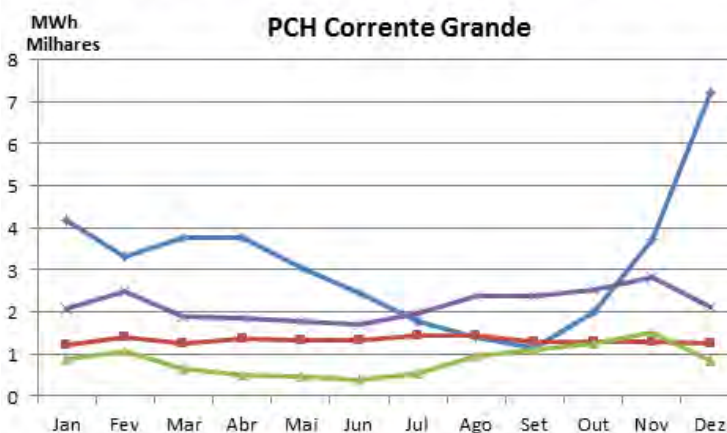




60,75% Repotencialização  
 15,19% Complementaridade  
 Território Vale do Rio Doce  
 Bacia do Rio Doce



7,30% Repotencialização  
 Território Vale do Rio Doce  
 Bacia do Rio Doce



69,17% Repotencialização  
 23,05% Complementaridade  
 Território Vale do Rio Doce  
 Bacia do Rio Doce

**Figura 50: Usinas analisadas**

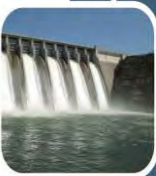
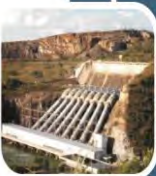
Fonte: Elaborado pelos autores

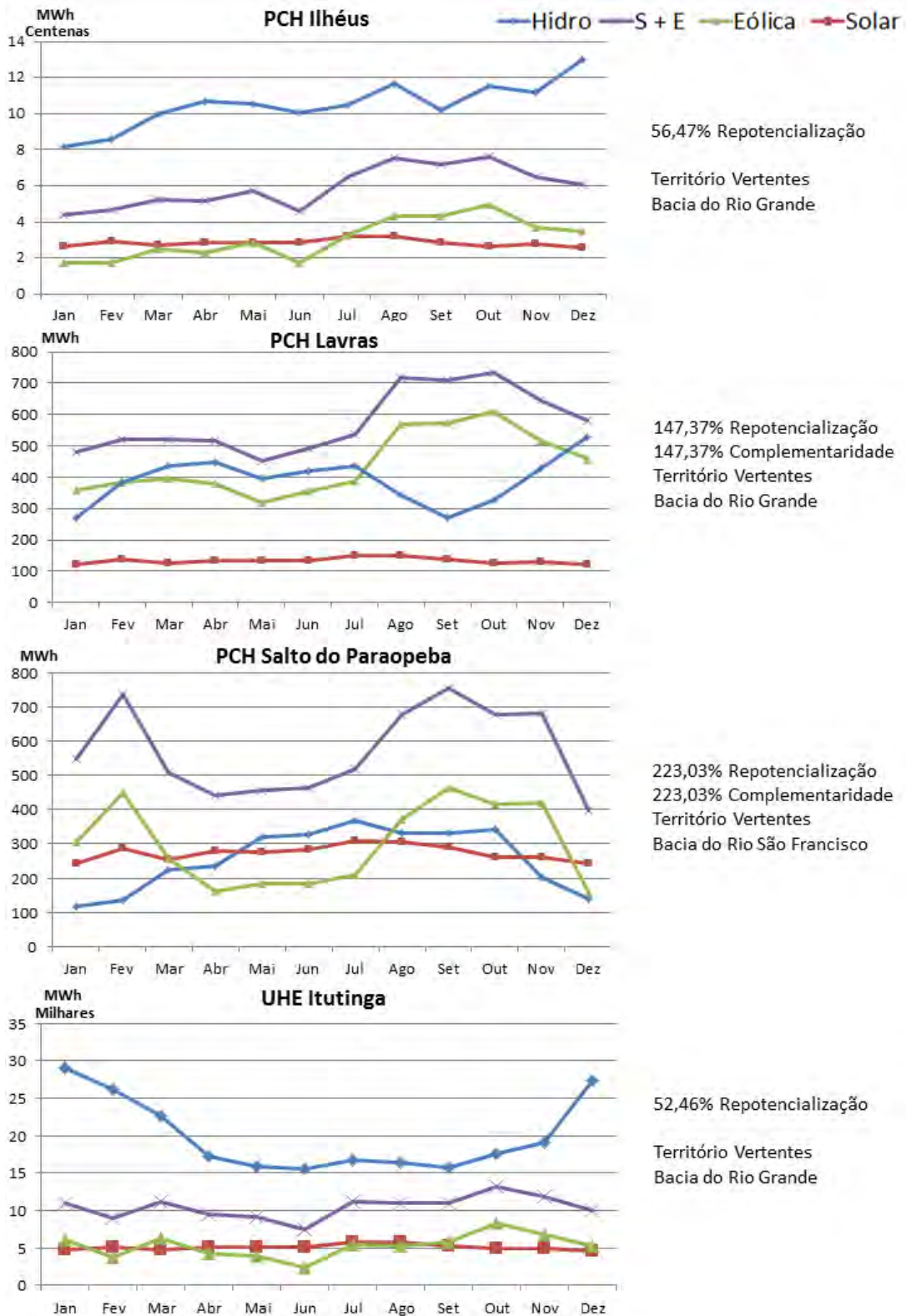
#### 4.1.16. Vertentes

No Território Vertentes foram analisadas 4 usinas, onde 2 apresentaram valores de complementaridade e duas, repotencialização. Todas as usinas apresentaram valores de repotencialização superiores a 50%, e os casos mais



promissores foram os das PCHs Lavras e Salto do Paraopeba, com 147% e 223,03% de repotencialização e complementaridade, respectivamente.





**Figura 51: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

## 4.2. RESULTADOS: ANÁLISE ENTRE CENÁRIOS PROSPECTIVOS

Este trabalho foi realizado mediante a concepção de dois cenários de análise. Os resultados apresentados até o momento foram concebidos para o cenário 2, que é aquele que realiza o dimensionamento das usinas solares e eólicas considerando que elas possuem a mesma potência instalada das usinas hidráulicas analisadas, ou seja, 100% de sua potência. Os resultados provenientes do cenário 2, que é aquele que realiza o dimensionamento das usinas solares e eólicas considerando que elas possuem metade, ou seja, 50% da potência instalada das usinas hidráulicas analisadas são apresentados no Relatório 1 desta pesquisa (FEAM, 2015). Na Figura 52 são apresentados os cenários de análise utilizados.

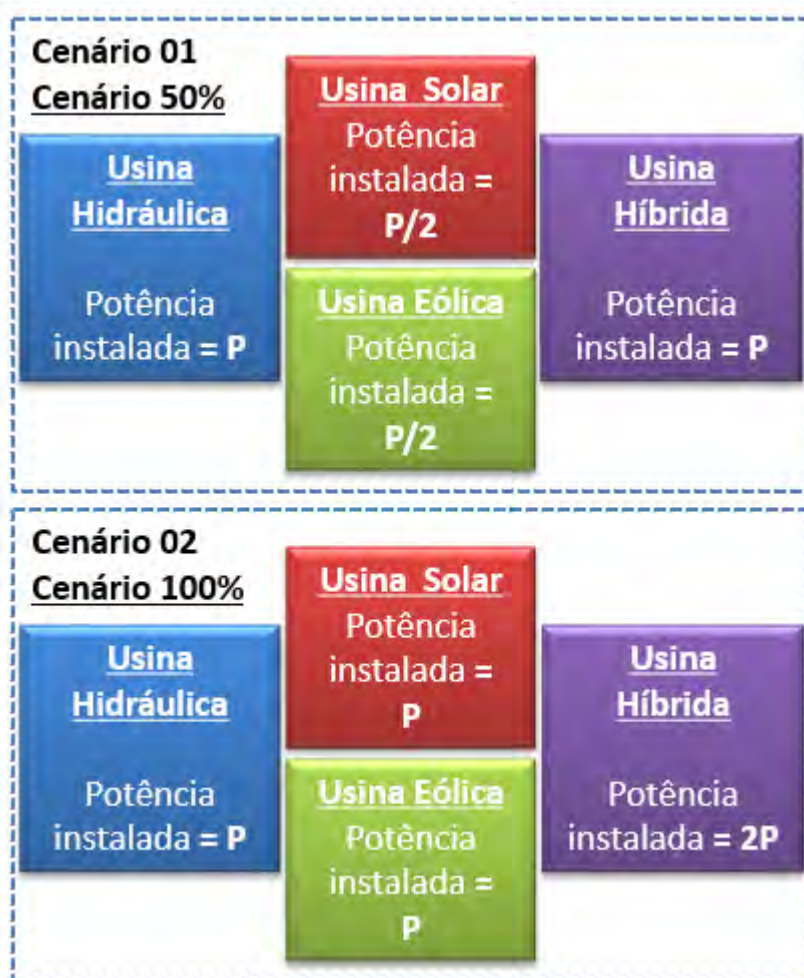
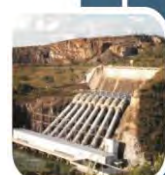


Figura 52: Cenários de análise

Fonte: Elaborado pelos autores





Nos itens a seguir, os resultados dos dois cenários são traçados graficamente junto ao perfil de geração das usinas hidráulicas, visando à comparação dos resultados para cada usina analisada, em termos dos ganhos relacionados à complementaridade ou repotencialização, obtidas com a inserção da geração renovável, em cada cenário.

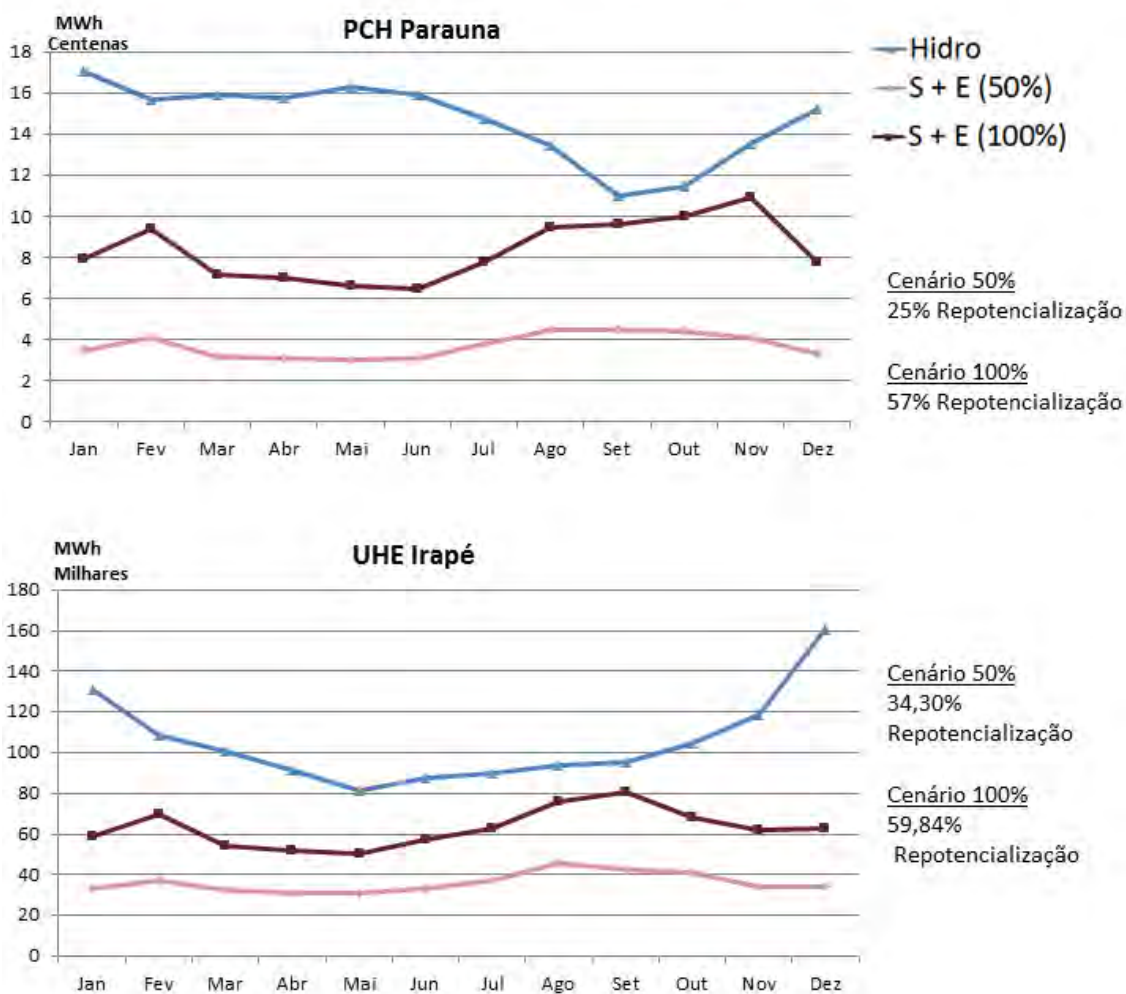
De uma forma geral, pode-se verificar que os melhores resultados em termos de repotencialização e complementaridade estão associados ao cenário 2, de 100% da potência instalada. Os ganhos relacionados a este cenário com relação ao cenário 1, contudo, não se dão de forma proporcional. Ou seja, a duplicação da potência instalada das usinas não leva a uma duplicação da energia gerada. Embora se verifique o aumento da energia gerada, este aumento é diferente de usina para usina, ou seja, se modifica de acordo com as características das regiões.

Conforme já apontado anteriormente, no dimensionamento das usinas eólicas, foram utilizados os dados históricos de velocidades dos ventos registrados pelas estações do INMET. Na elaboração do cenário 50%, estes dados foram utilizados da forma como se encontravam nos registros oficiais do INMET. Contudo, durante a elaboração do cenário 100%, observou-se a ocorrência de valores nulos de velocidade de ventos, possivelmente devido a medições não registradas. Assim, visando melhorar o desempenho do cenário de 100%, realizou-se o pré-processamento destes valores de velocidades da forma já mencionada na metodologia, onde, para os valores iguais a zero, foi atribuído o valor da média das velocidades registradas em anos anteriores, no mesmo dia e horário, desconsiderando valores iguais a zero.

#### **4.2.1. Alto Jequitinhonha**

No Território do Alto Jequitinhonha, as usinas analisadas não apresentaram complementaridade em nenhum dos cenários avaliados, apresentando apenas valores de repotencialização.



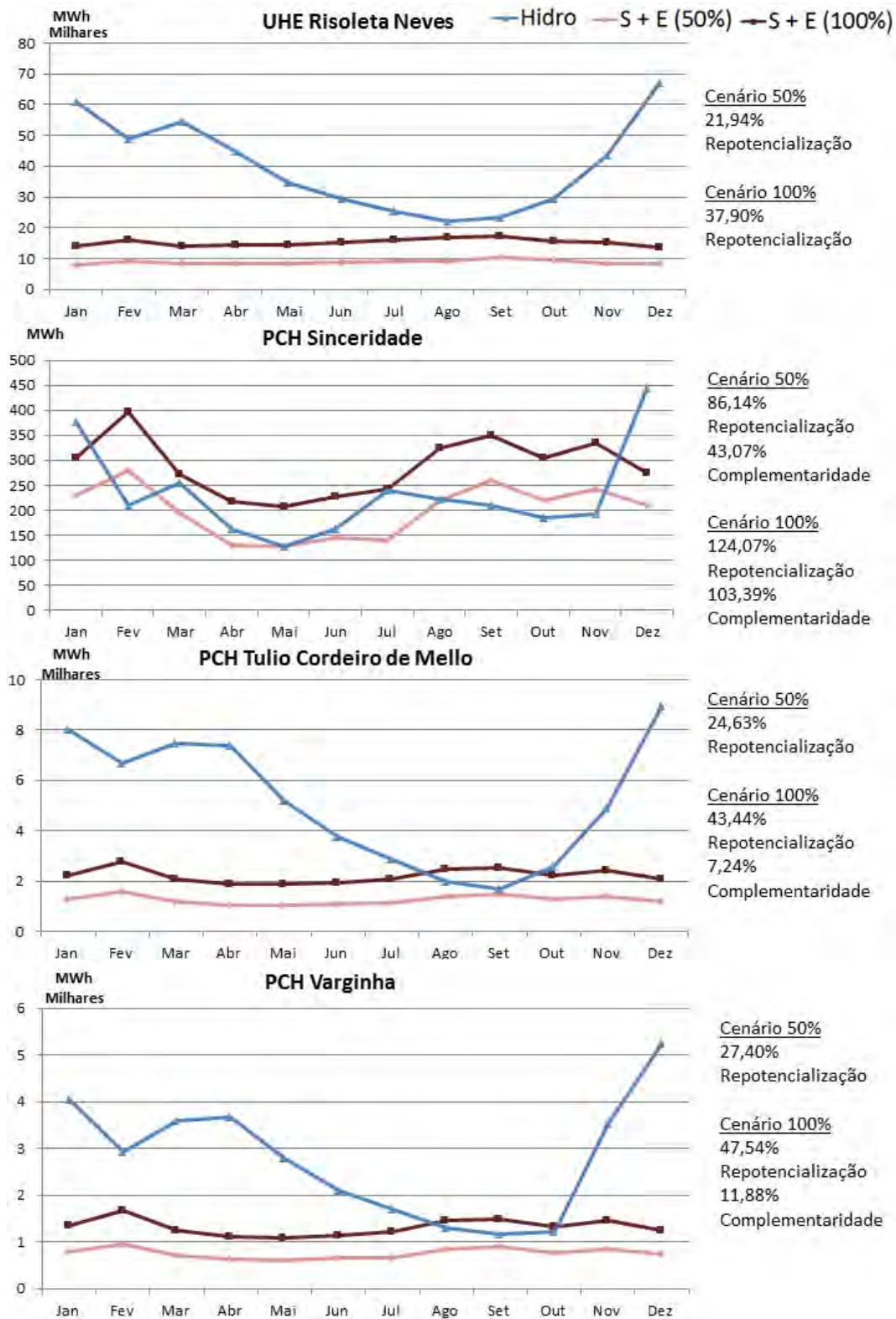


**Figura 53: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

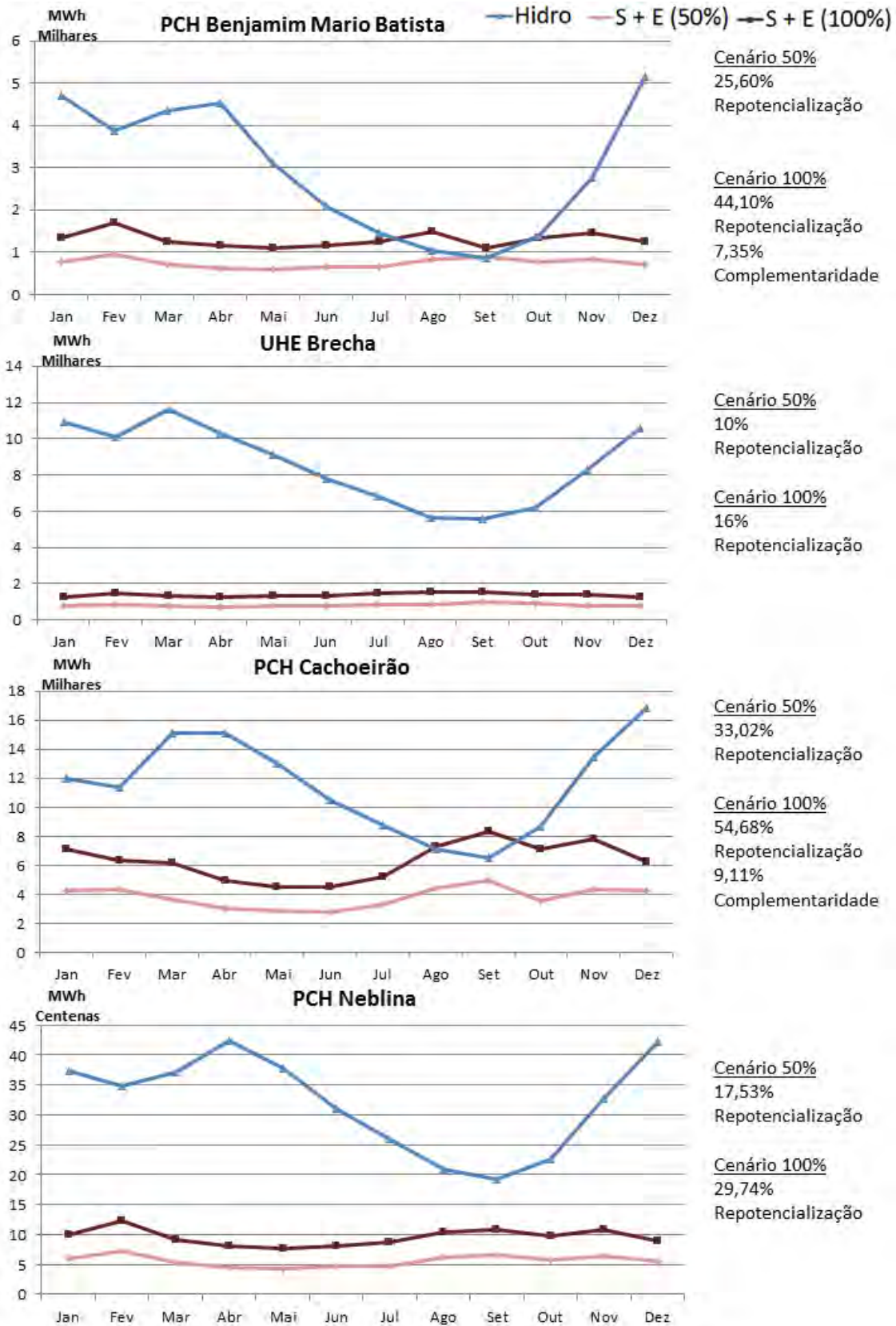


### 4.2.2. Caparaó



**Figura 54: Usinas analisadas**

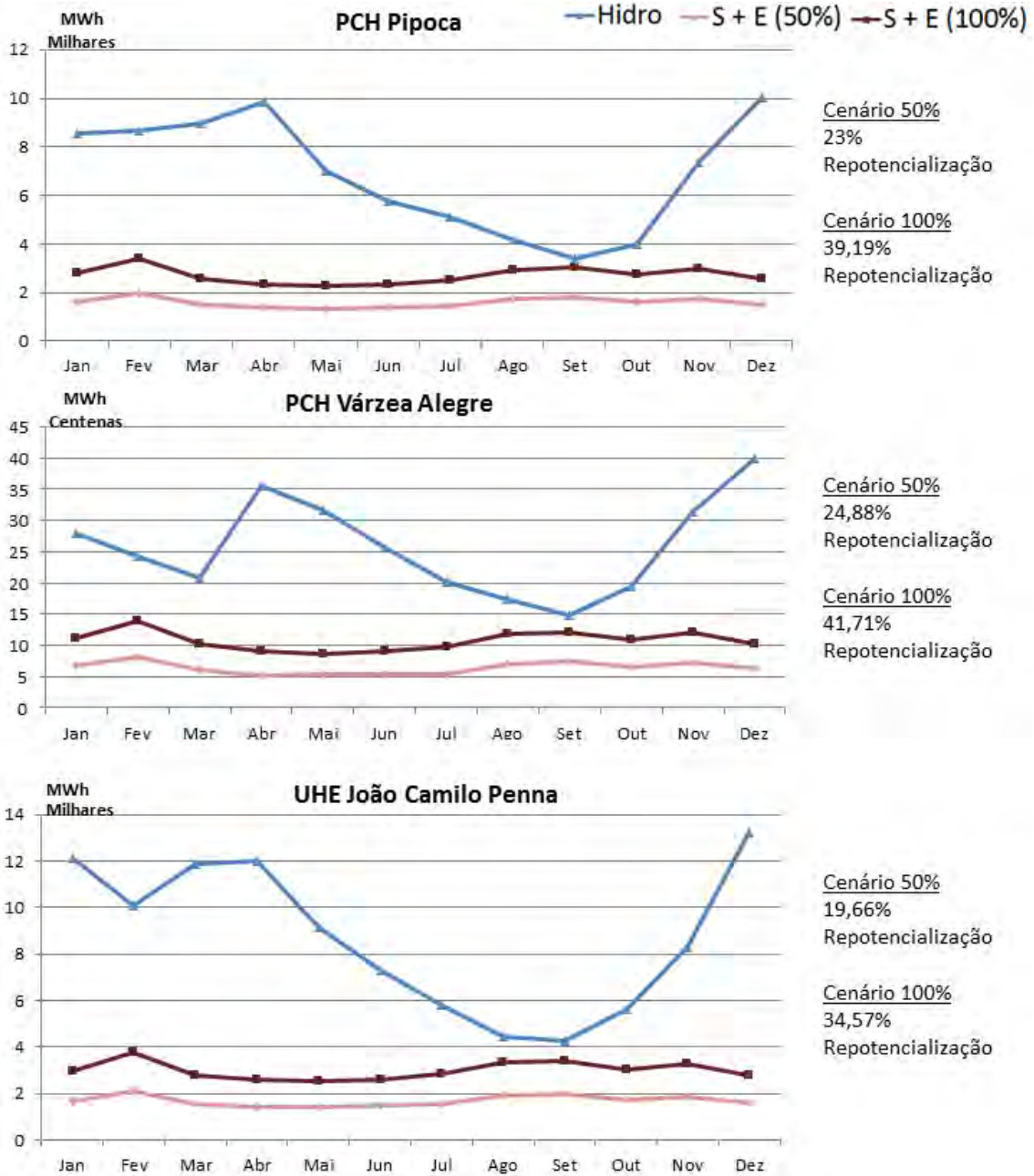
Fonte: Elaborado pelos autores



**Figura 55: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores





**Figura 56: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

### 4.2.3. Central

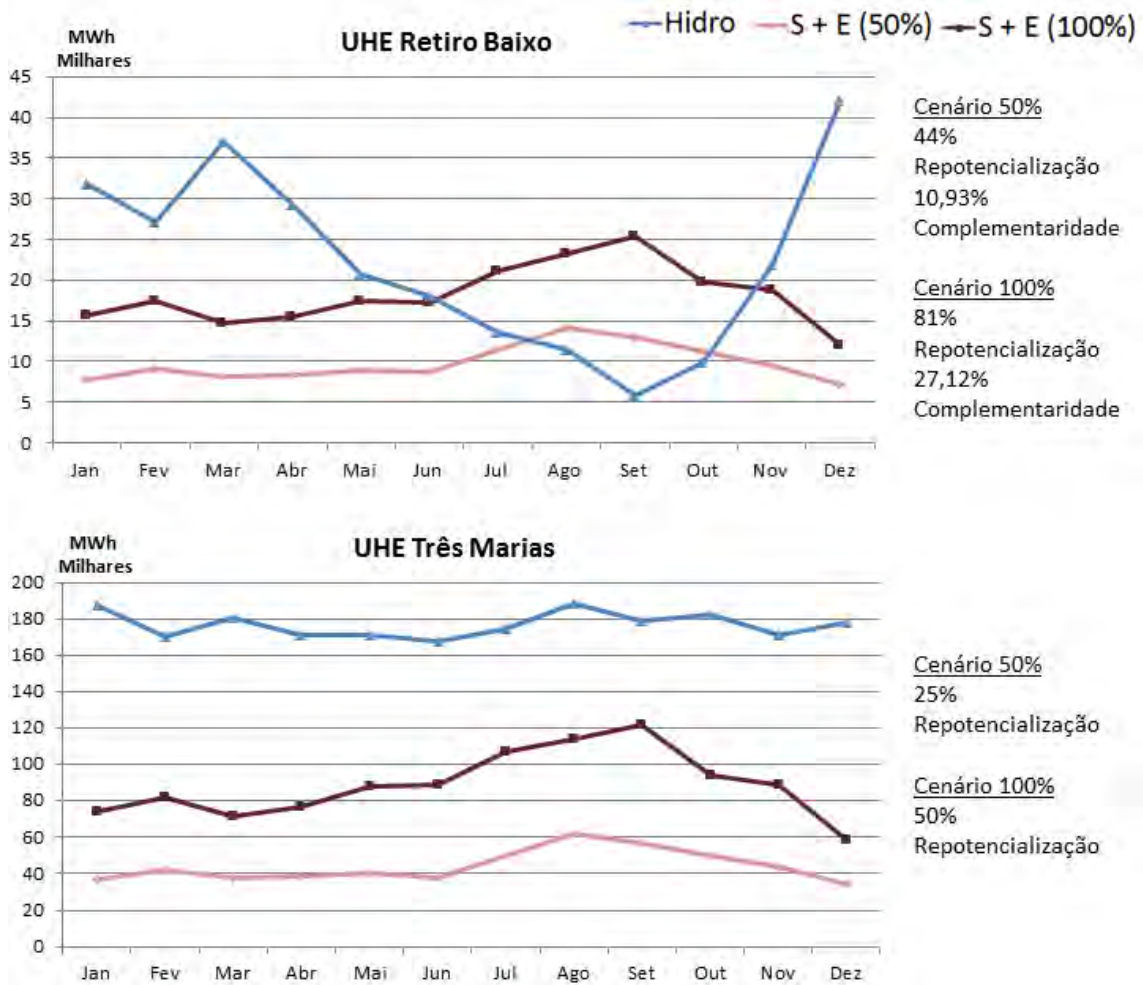
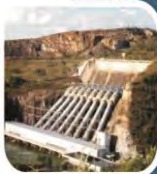
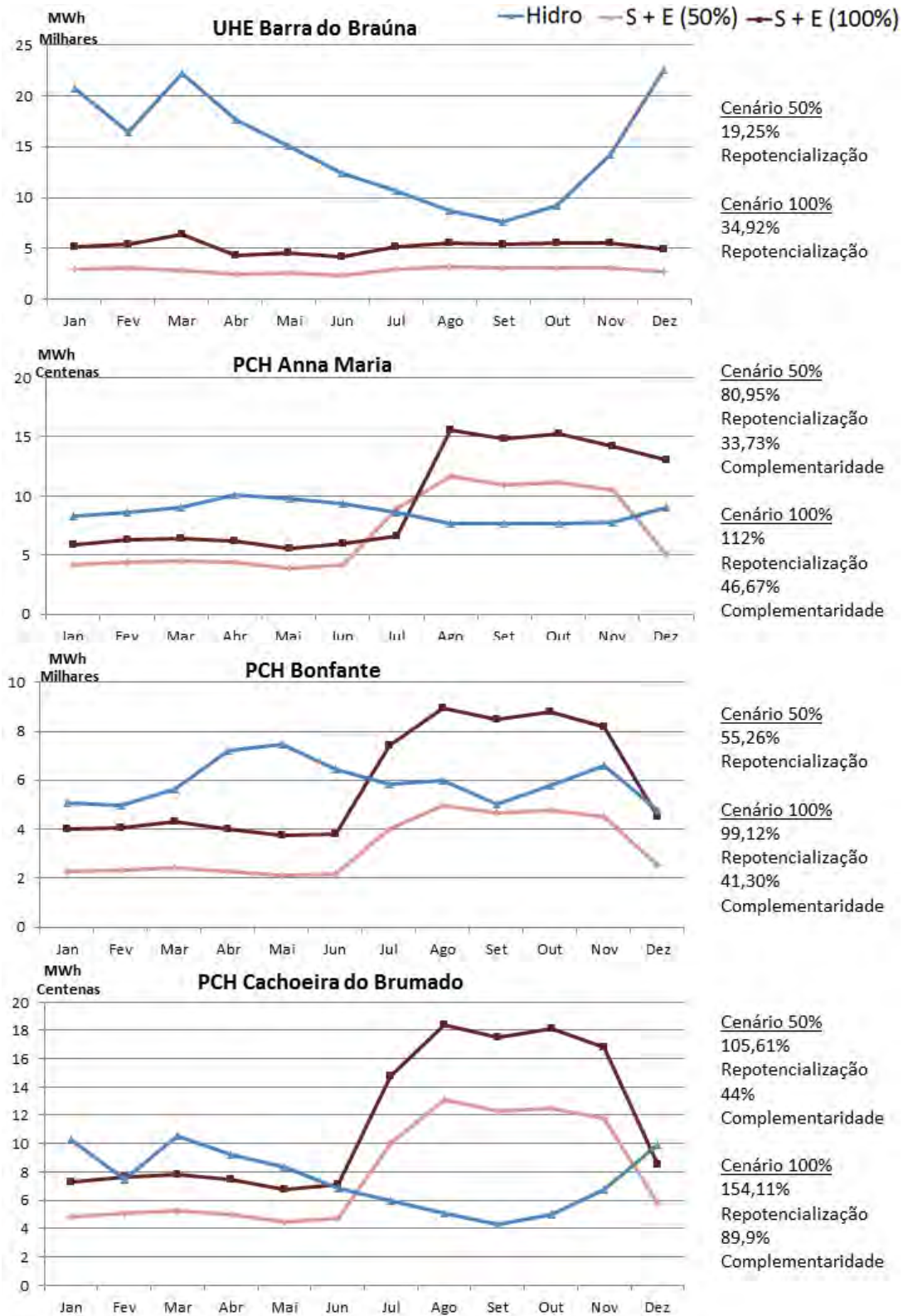


Figura 57: Usinas analisadas

Fonte: Elaborado pelos autores



#### 4.2.4. Mata



**Figura 58: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

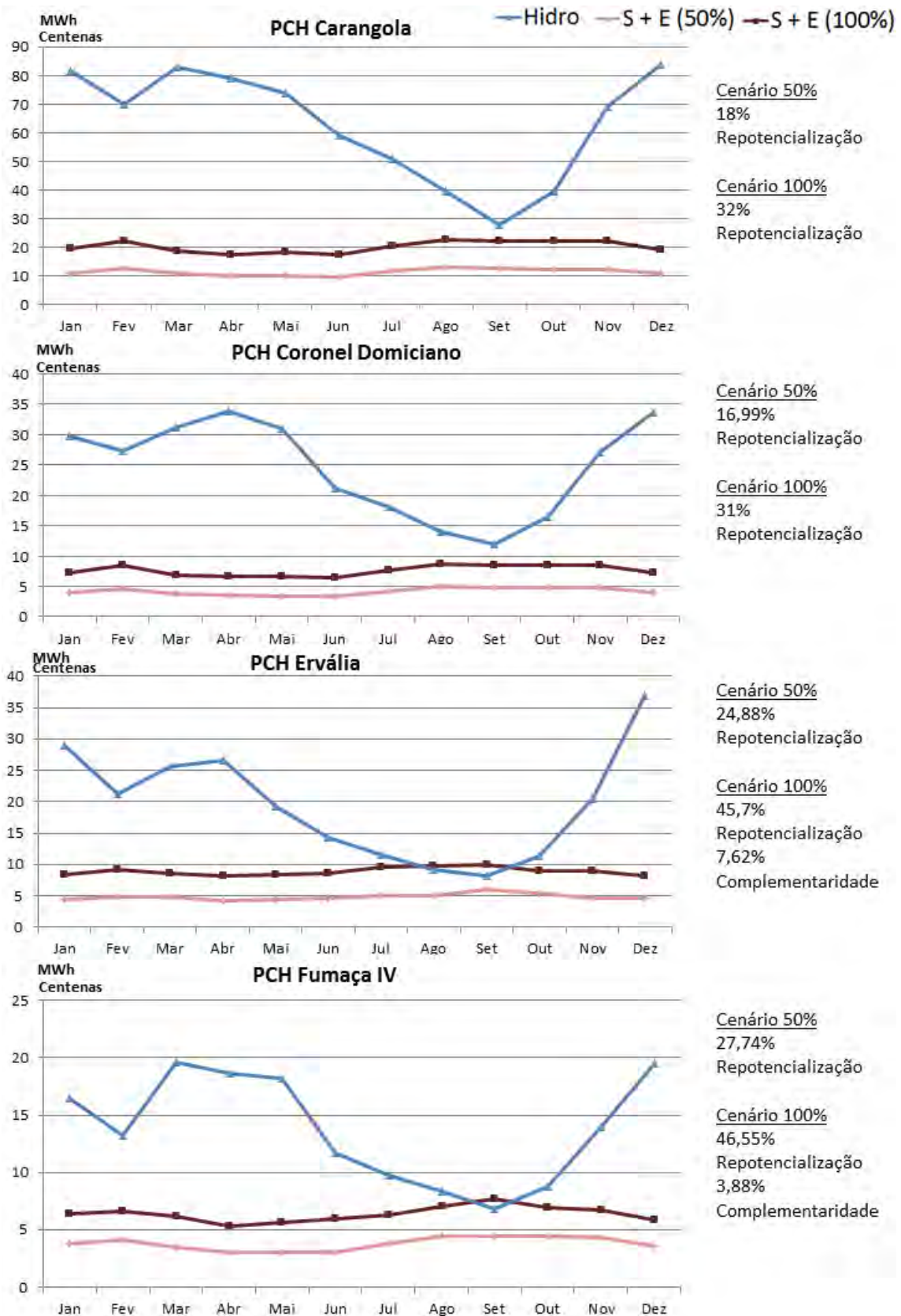
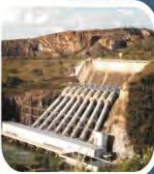


Figura 59: Usinas analisadas

Fonte: Elaborado pelos autores



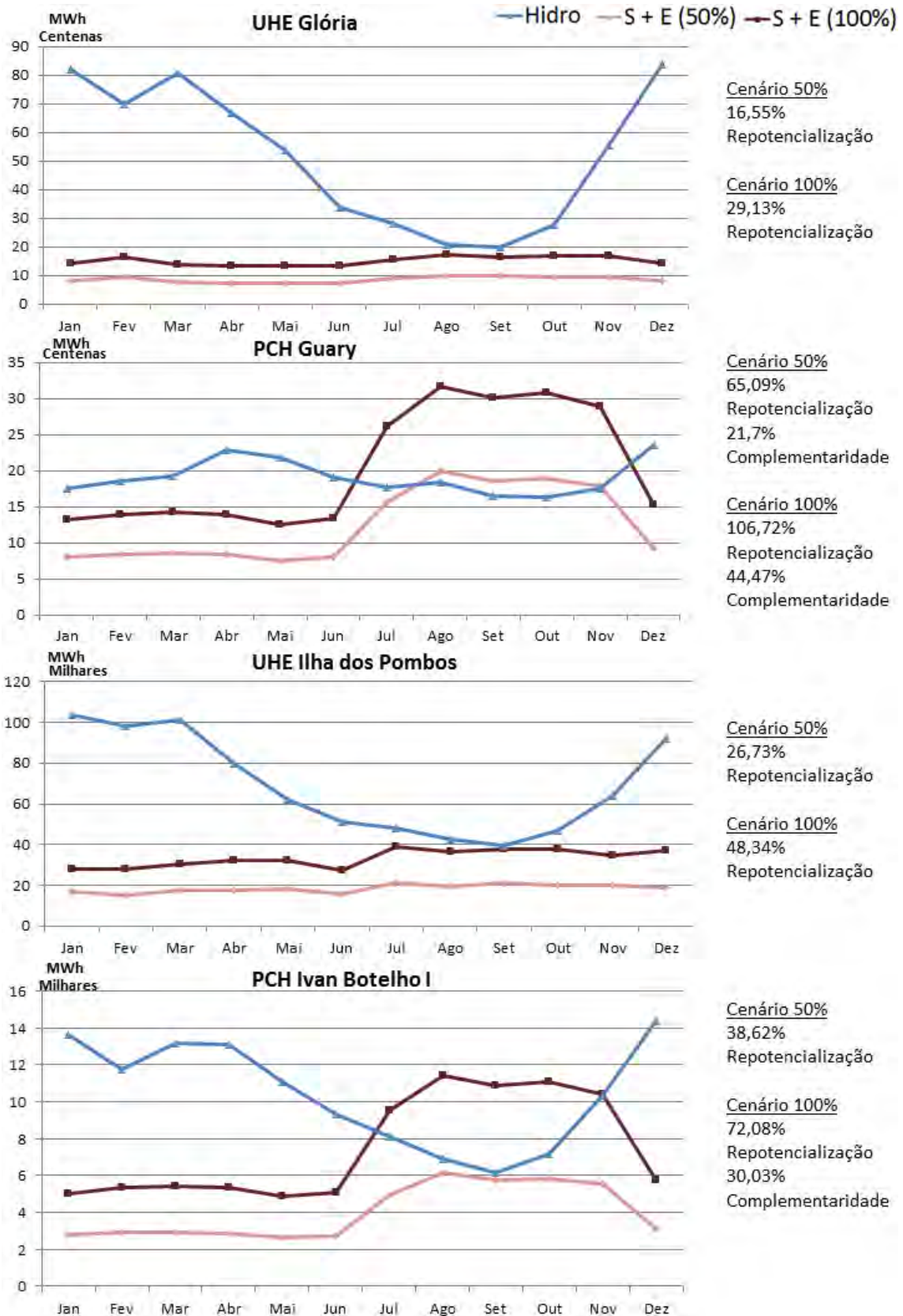
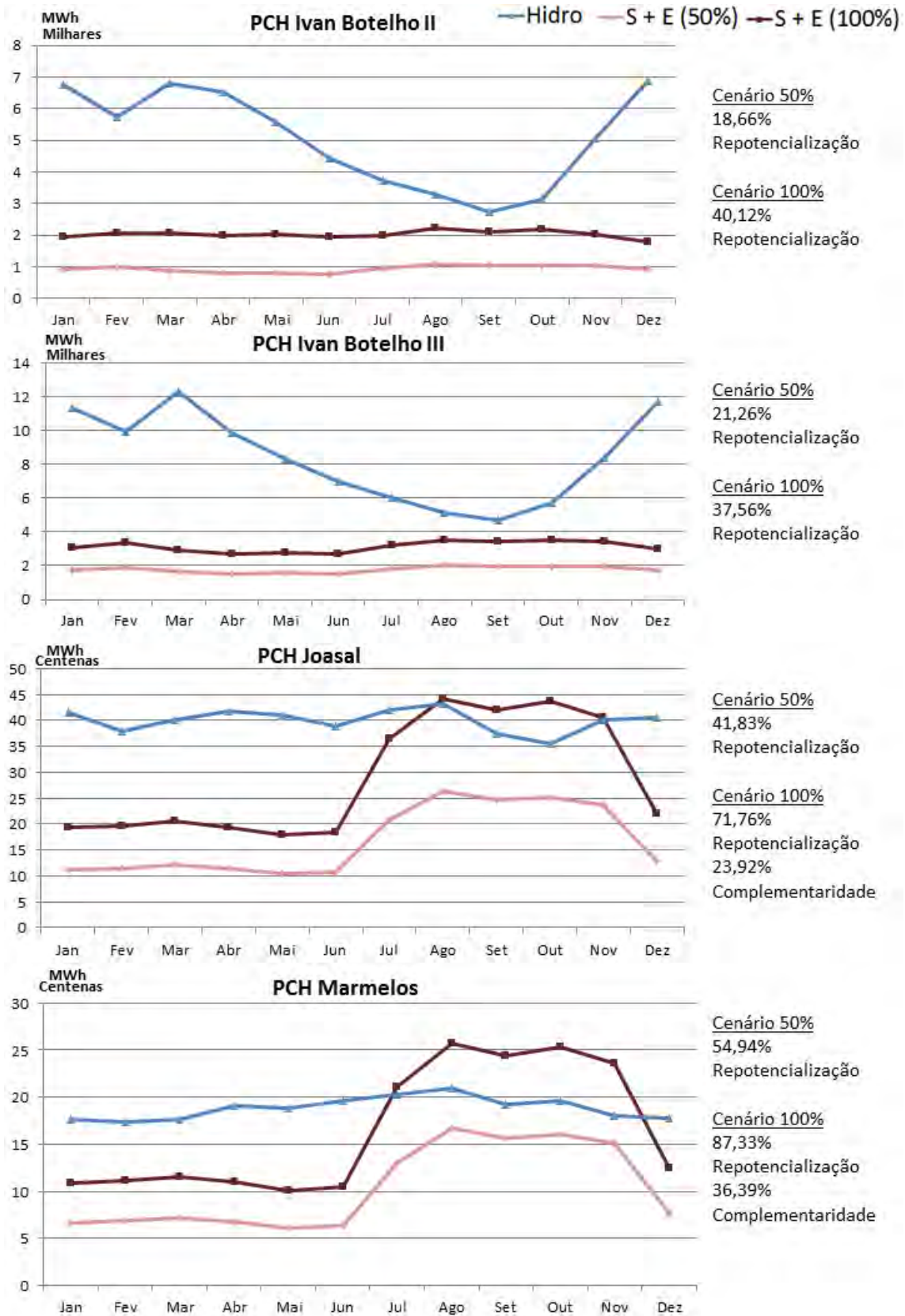


Figura 60: Usinas analisadas

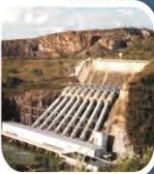
Fonte: Elaborado pelos autores





**Figura 61: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores



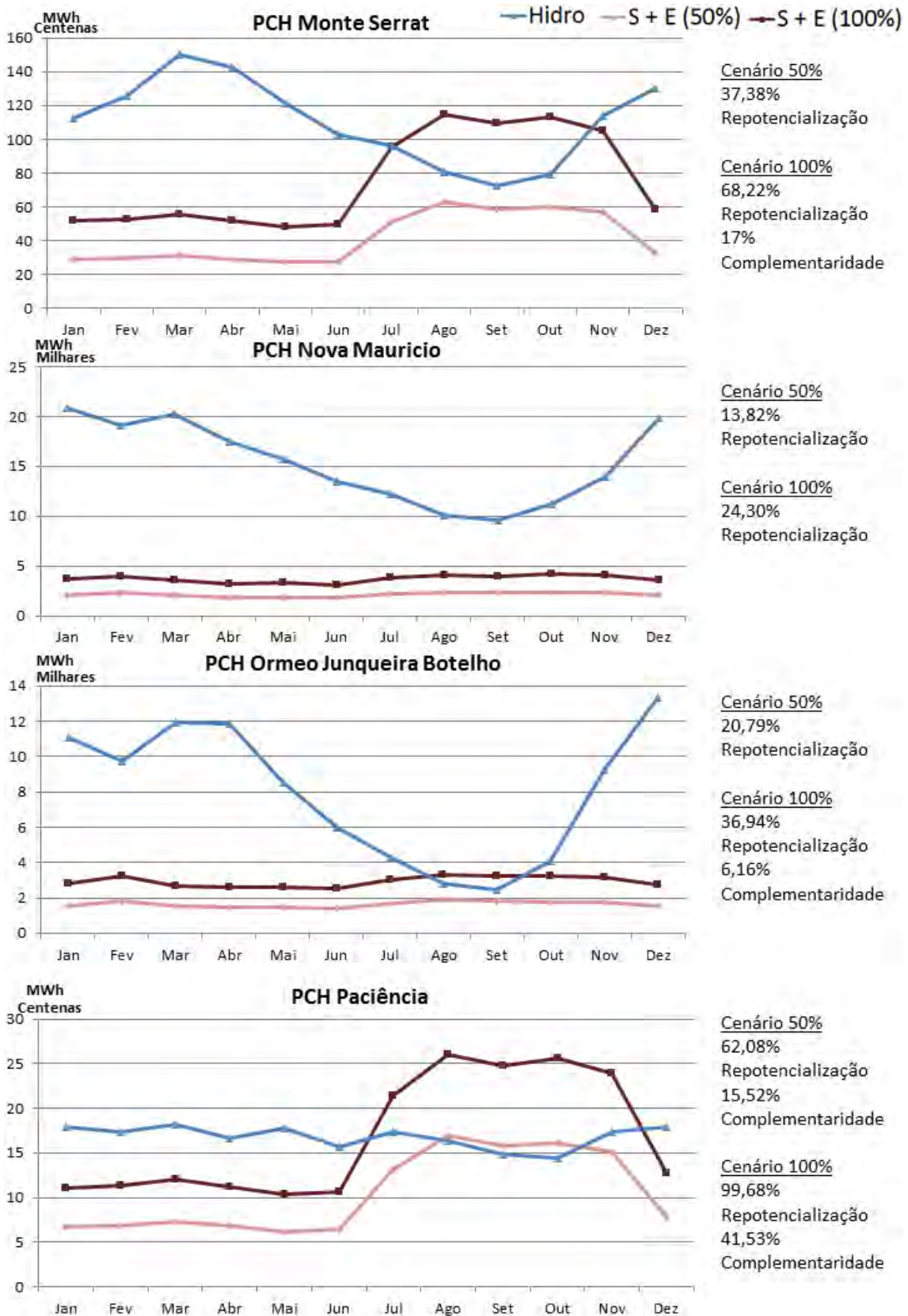
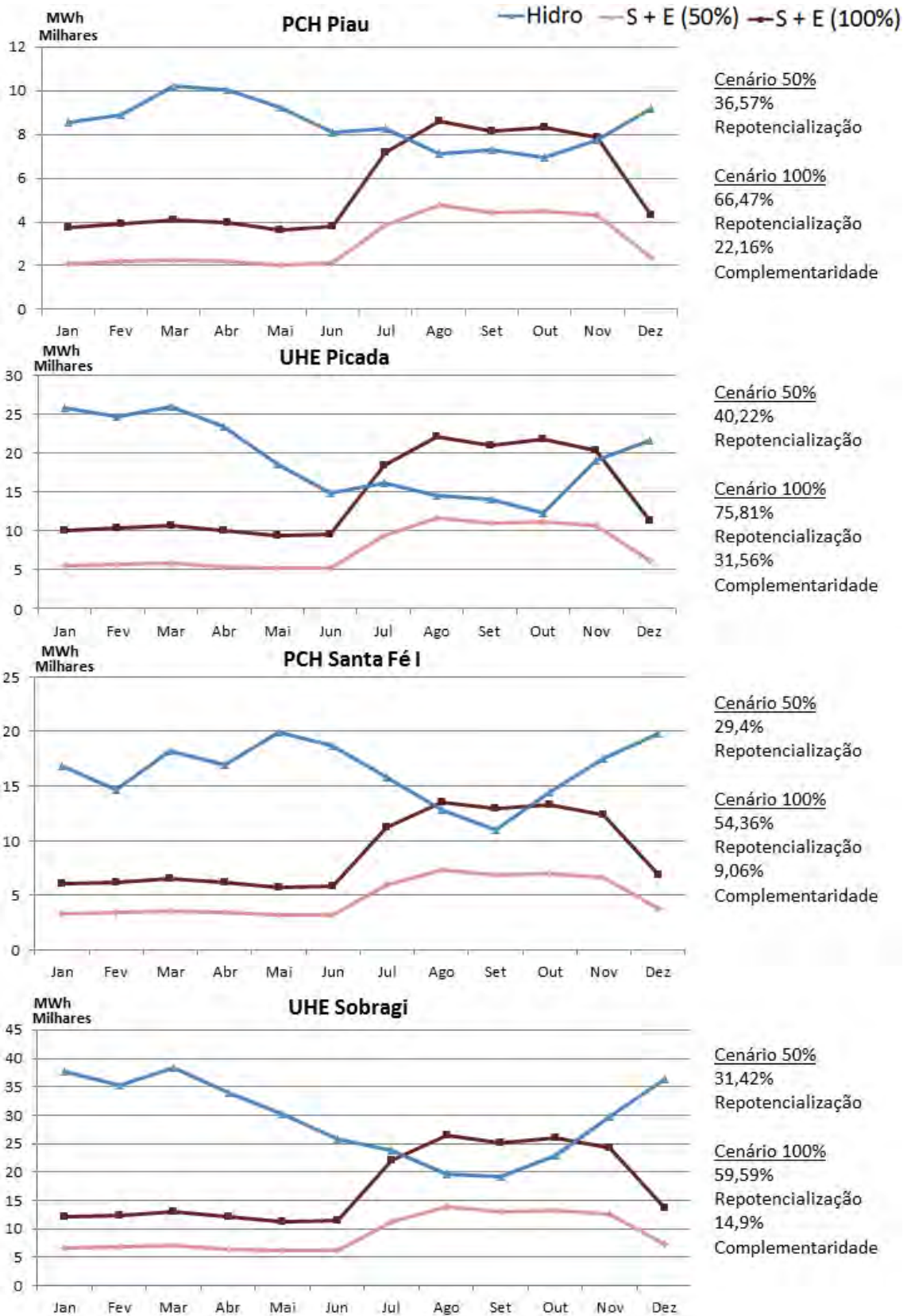


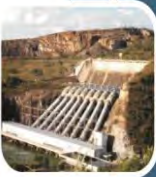
Figura 62: Usinas analisadas

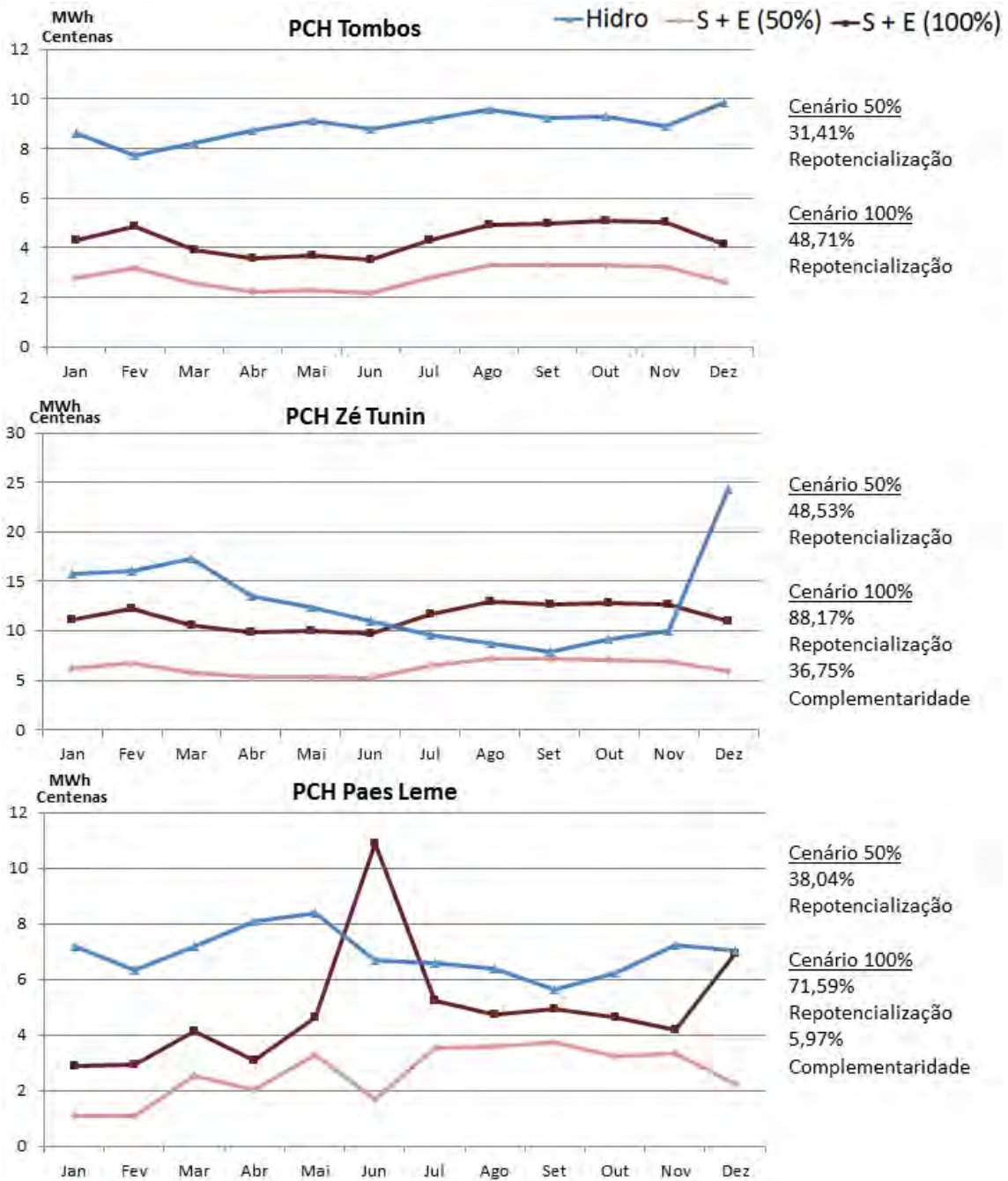
Fonte: Elaborado pelos autores



**Figura 63: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores





**Figura 64: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores

### 4.2.5. Metropolitana

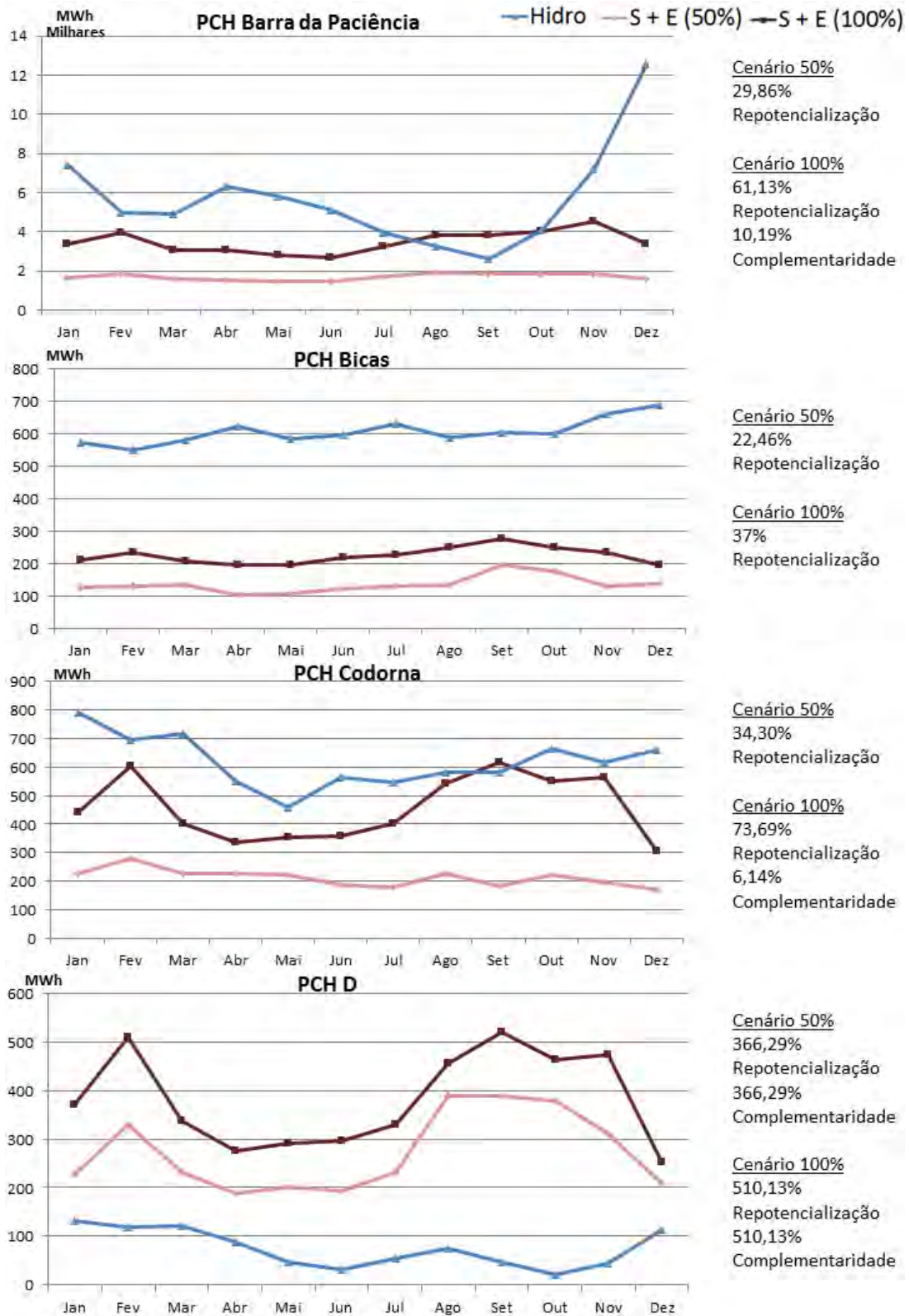
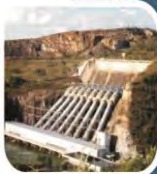


Figura 65: Usinas analisadas

Fonte: Elaborado pelos autores



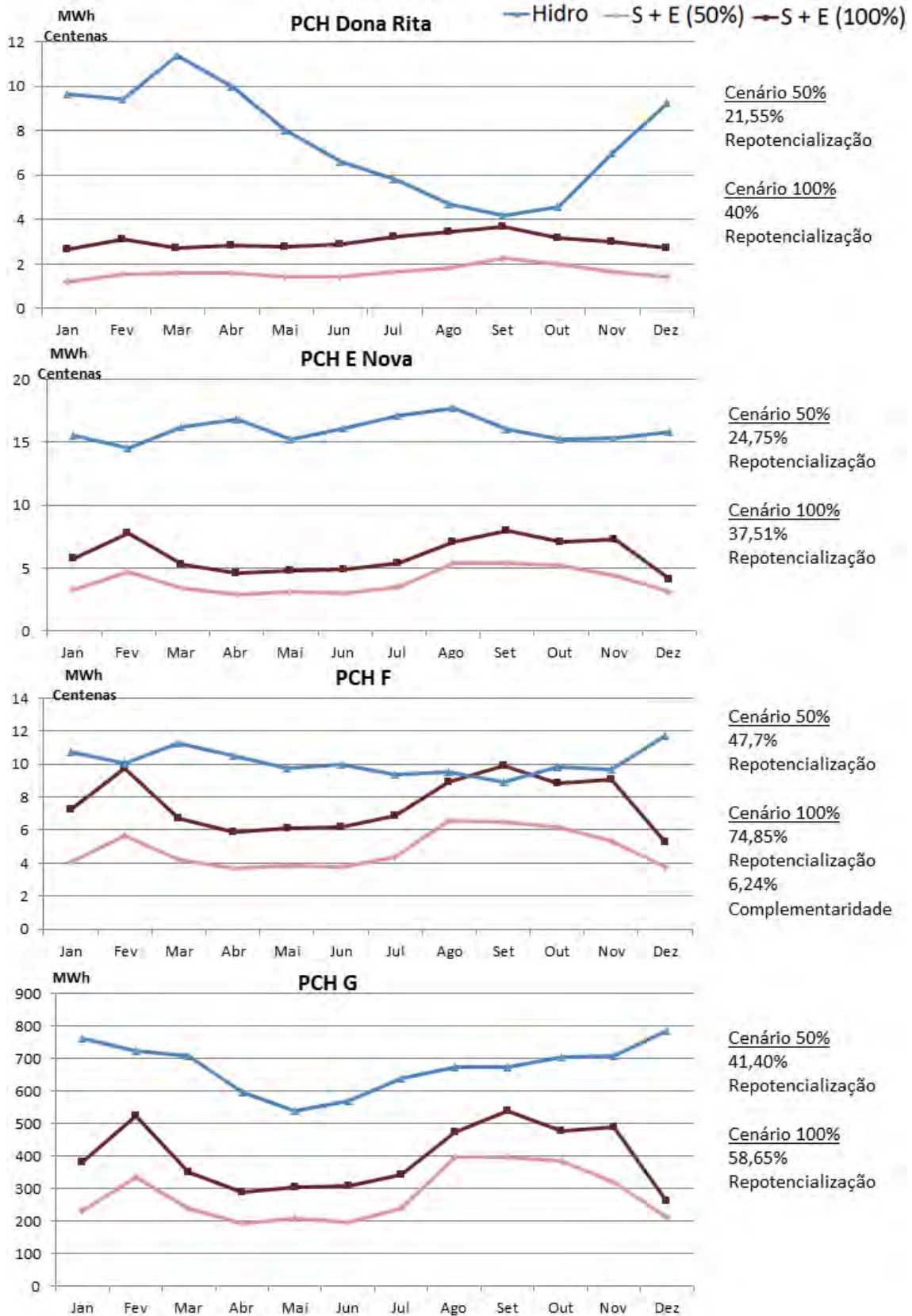
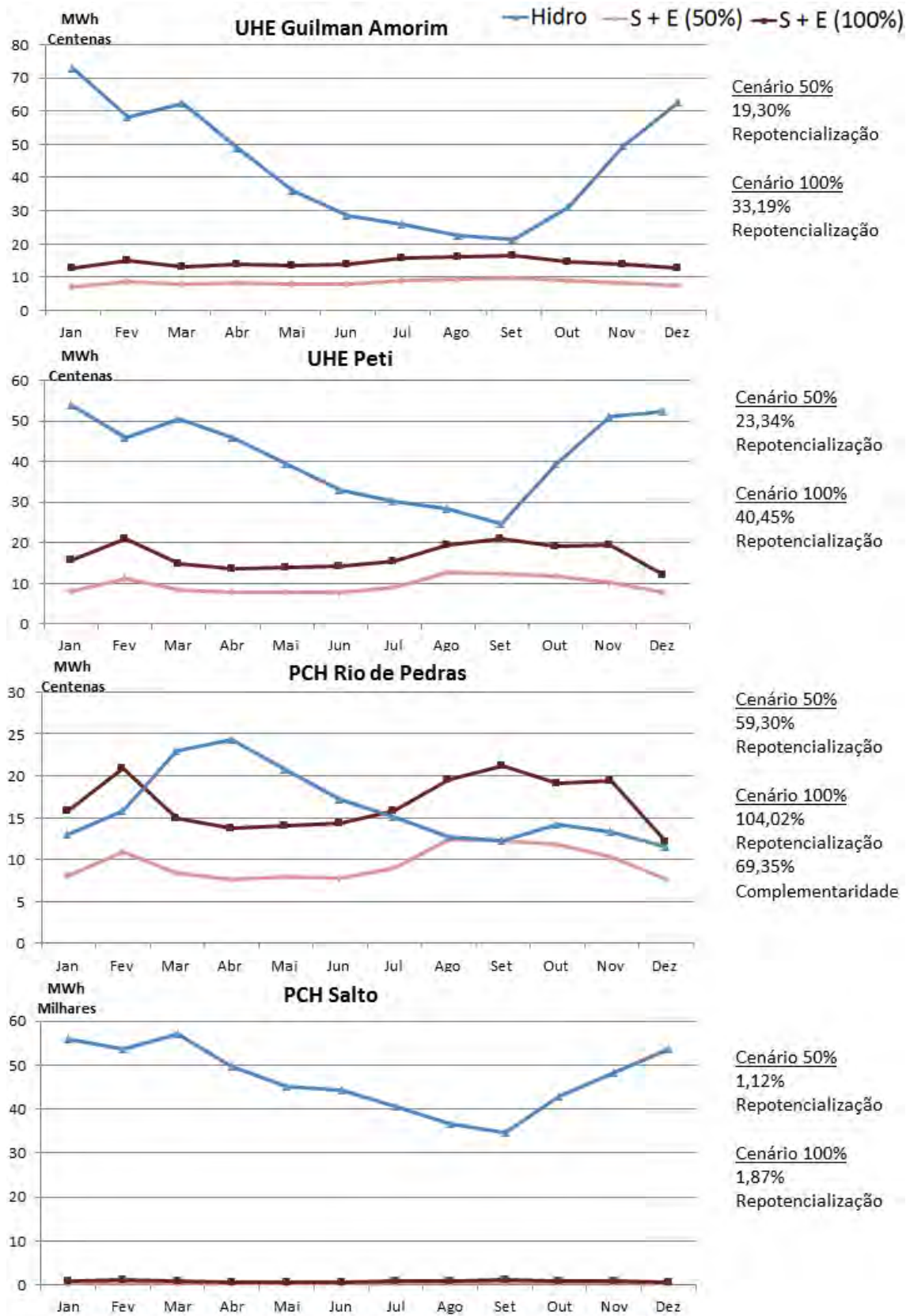


Figura 66: Usinas analisadas

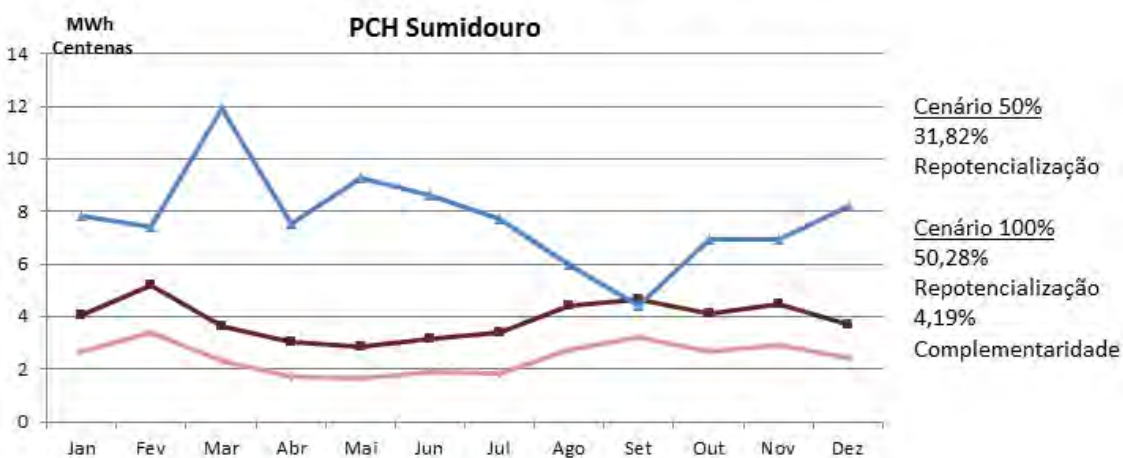
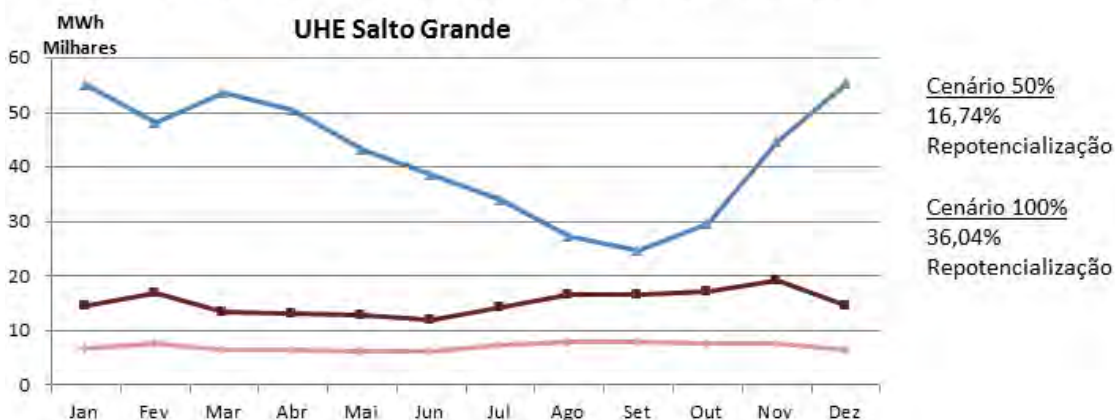
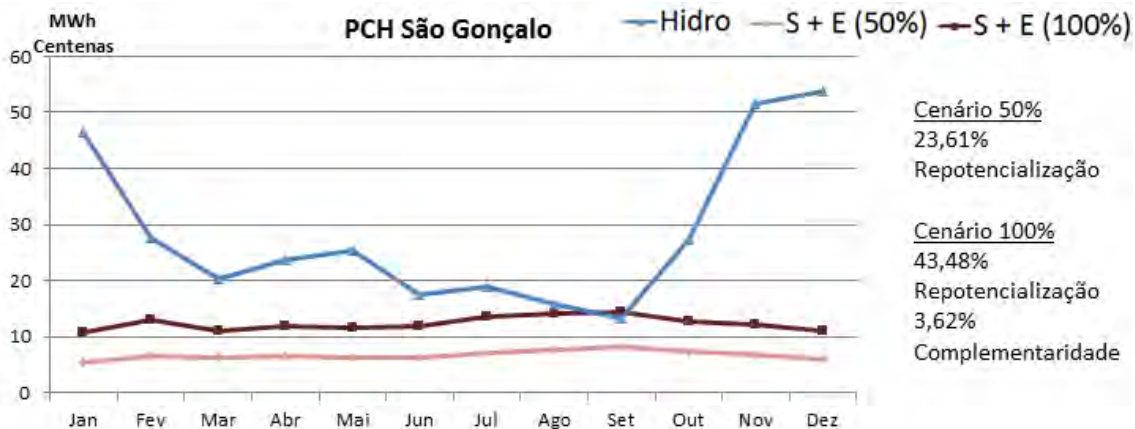
Fonte: Elaborado pelos autores



**Figura 67: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores





**Figura 68: Usinas analisadas**

Fonte: Elaborado pelos autores