IEE USP

INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

IEE USP
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ENERGY STORAGE SEMINAR

STATE OF THE ART OF ENERGY STORAGE AND INSERTION OF INTERMITTENT RENEWABLE SOURCES

19 e 20 MARCH, 2018 * SÃO PAULO - SP

INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
IEE/USP

INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Characteristics of Brazilian electric system and potential contributions of energy storage

Prof. Ildo Luís Sauer

Realização IEE USP – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo

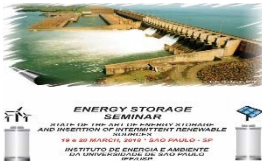
Promoção CESP Companhia Energética de São Paulo

Apoio U.S. CONSULATE, SÃO PAULO

Participação: ANEEL

Chamada de P&D Estratégico no. 21/2016. Projeto no. PD-00061-0054/2016

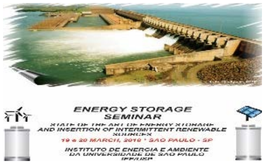
IEE USP
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



Brazilian National Interconnected Power System:

Total Capacity 152,980 MW Power Plants (June, 2017):

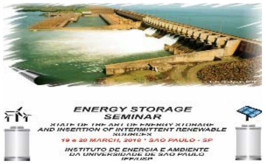
- Hydro 98,778 MW
  - Large and dispatchable 93,216 MW
  - Small 5,556 MW
- Thermal 43,253 MW
- Wind 10,712 MW
- Solar 237 MW
  - centralized 145 MW
  - Distributed 92 MW
- Other distributed sources 132 MW.



Brazilian National Interconnected Power System

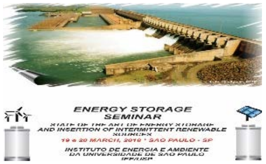
- 538,053 GWh Yearly (Jun/16-Mai/17)
- Total storage capacity of large hydro reservoirs 211,913 GWh
- Hence 39.3% of annual consumption
- Peak power demand (February 2014)
  - 85,708 MW
- Below of large hydro capacity
  - 93,216 MW

High voltage transmission lines (230kV to 750 kV) amount to 136,027 km.



Questions regarding storage in Brazil

- Putting aside restrictions in transmission capacity, in principle the system can meet its peak and energy demand, even with large participation of intermittent sources.
- In this context, the technical question then becomes, mainly, electric stability parameters such as voltage and frequency regulation under short-term large variability of the intermittent sources.
- Besides the technological challenges, the regulatory framework to be adopted and implemented, in order to stimulate a sustainable and efficient transition, is a matter open for discussion. Hence the importance of reviewing the international experience.



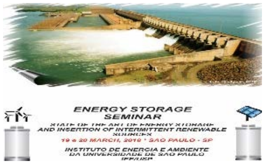
The seminar focus and questions

- The technical and economic strategies to accelerate the share of modern renewable energy in the Brazilian energy matrix.

- Explore the contribution of storage (here, mainly electrochemical and hydrogen) technologies.

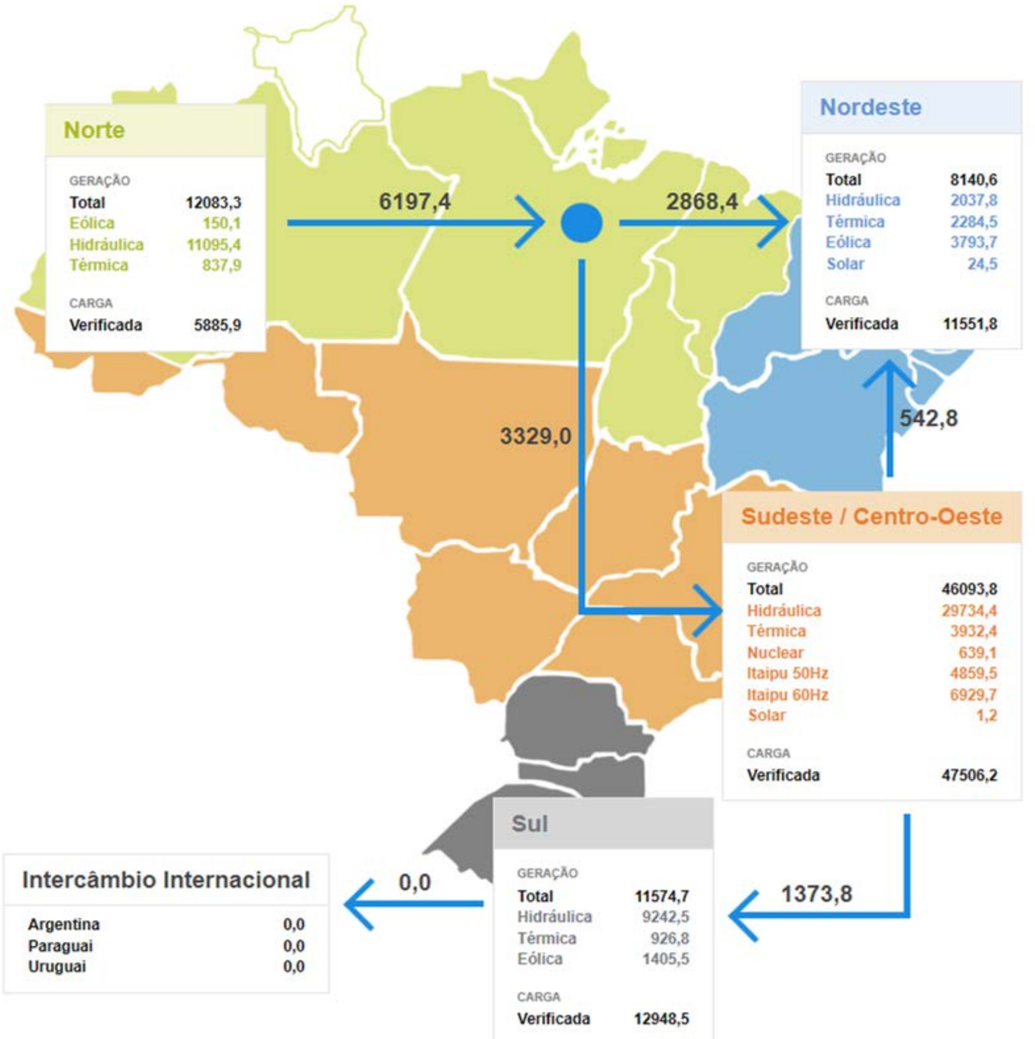
- Management and regulation, as well as other, beyond battery and hydrogen, storage strategies to optimize expansion and operation of the unique Brazilian Interconnected Power system under large penetration of wind and solar power sources

IEE USP
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

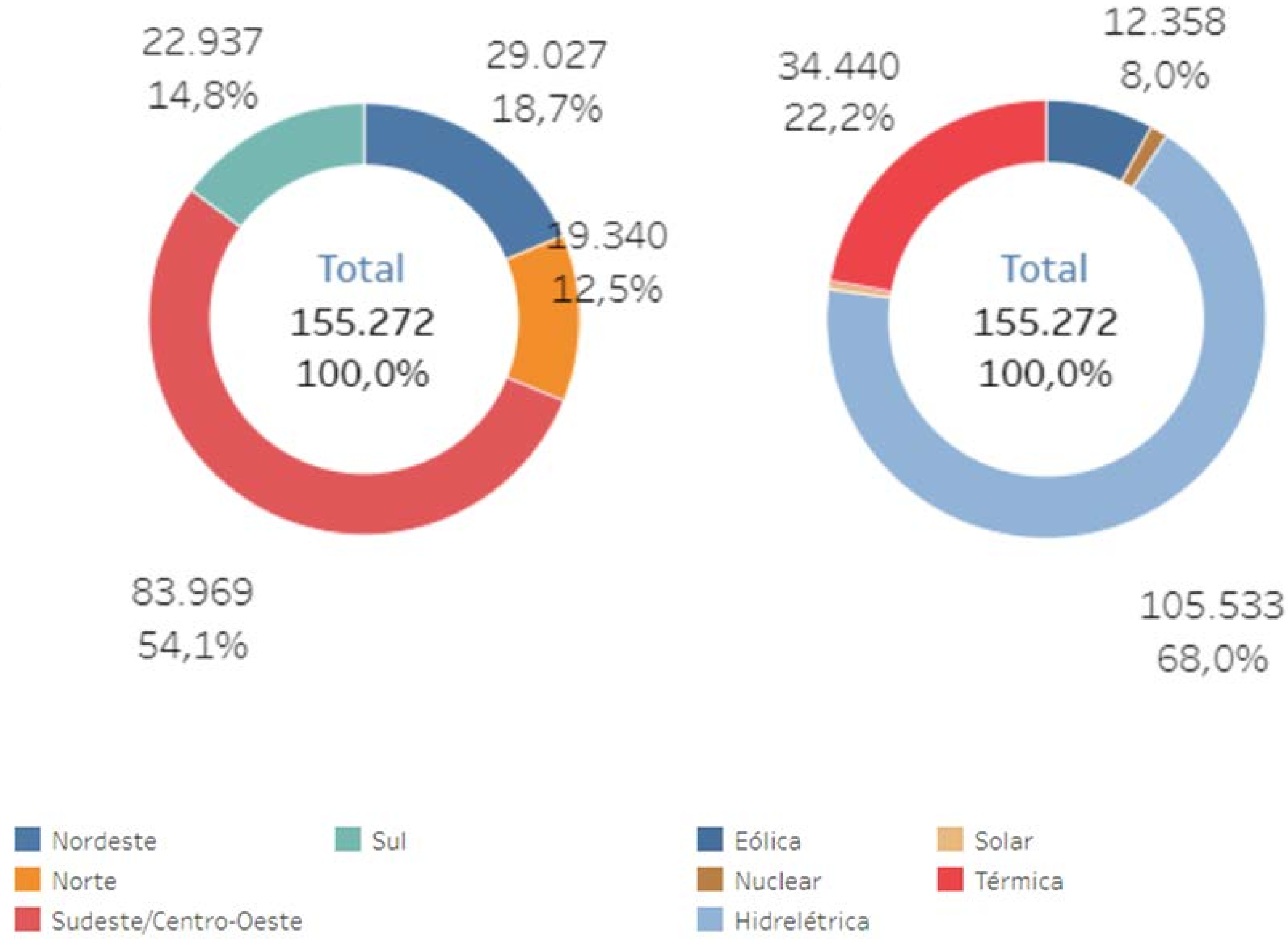


ON MARCH 15, 2018 - last thursday

GERAÇÃO= CARGA	77.895 MW
HIDRAULICA	52.110,1
TERMICA	7.981,6
NUCLEAR	639,1
ITAIPU	11.789,2
EOLICA	5.349,3
SOLAR	25,7

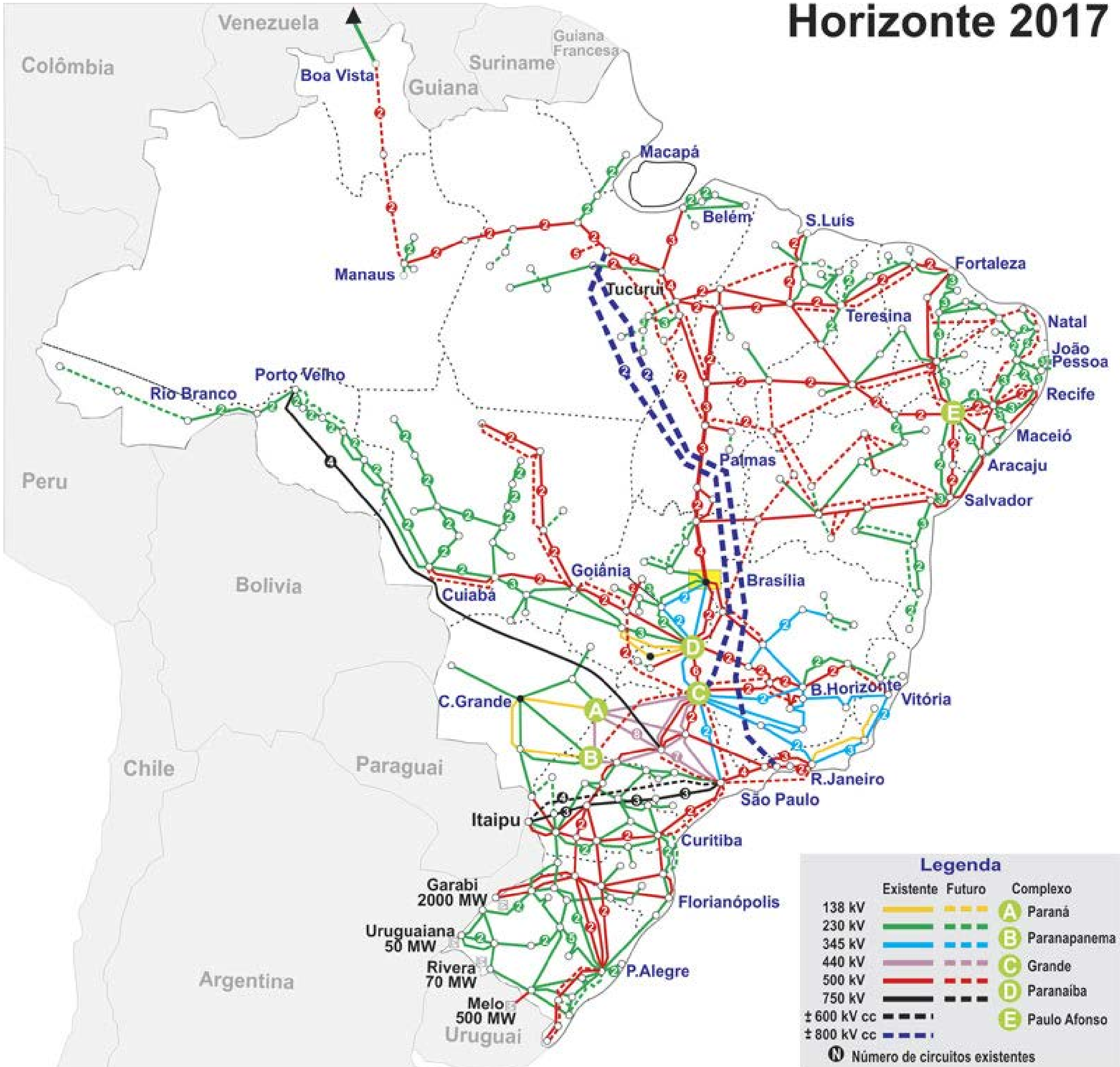


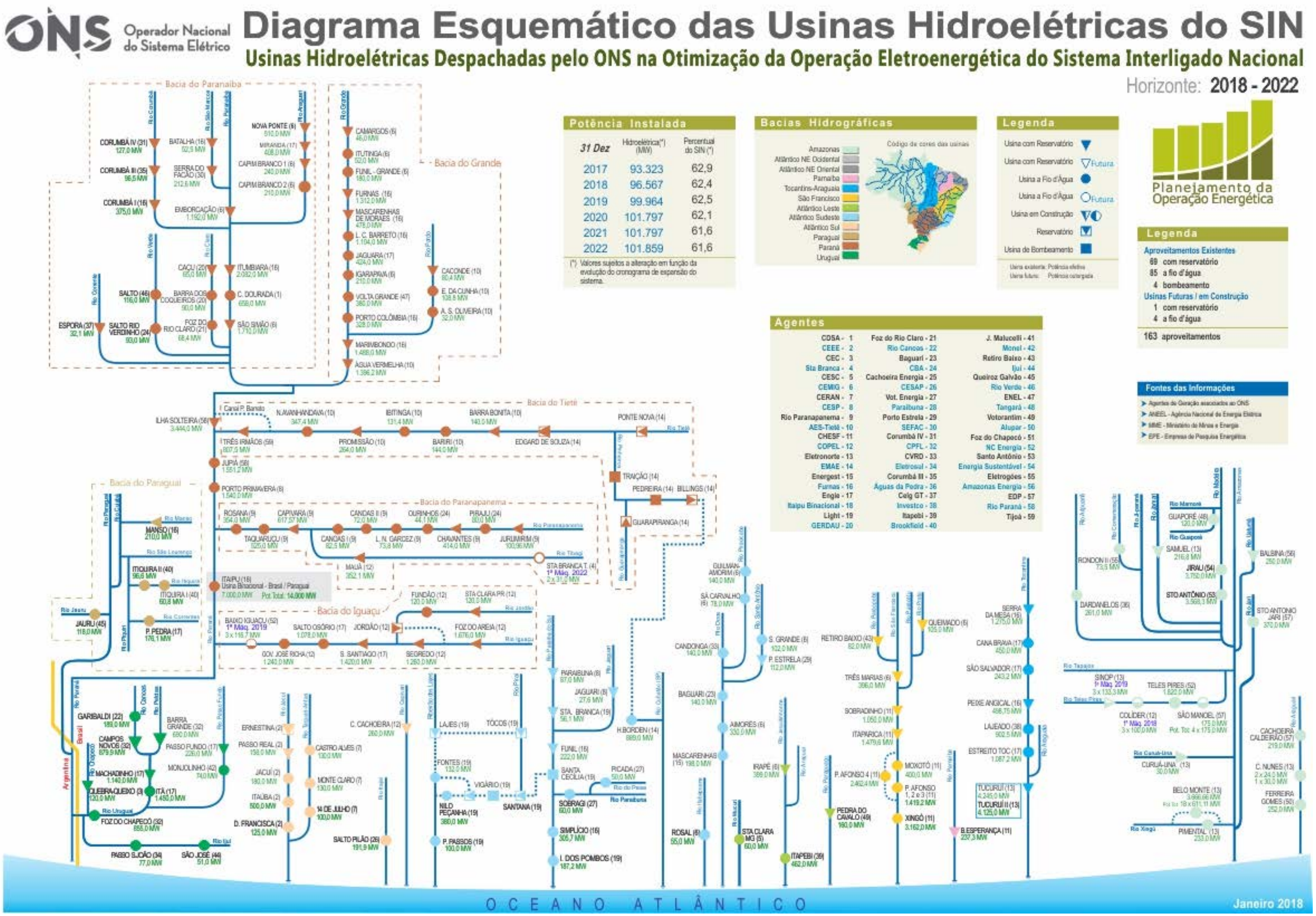
Installed Capacity (MW) Region and Source



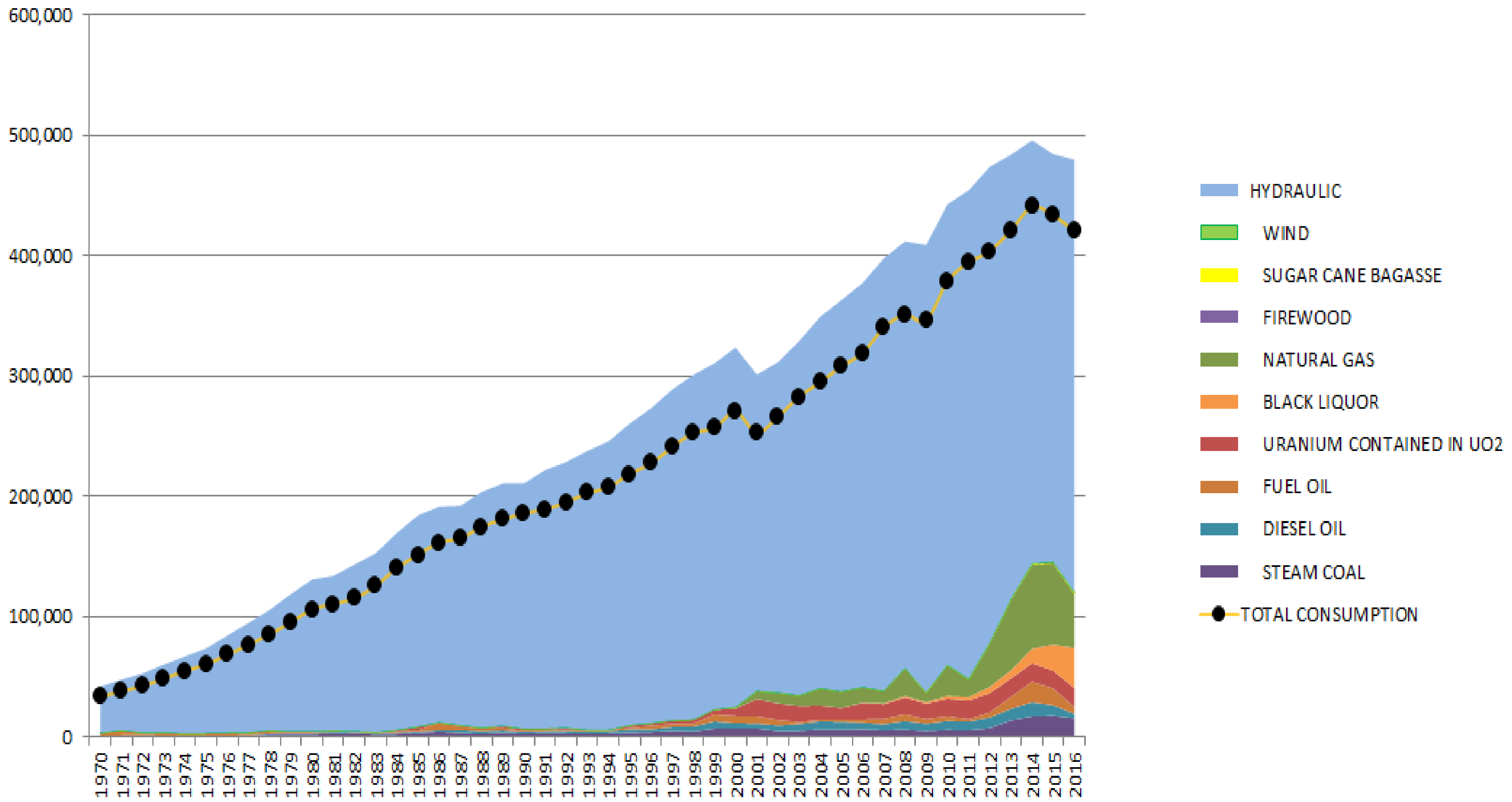
Source: ONS(2018)

National Interconnected System

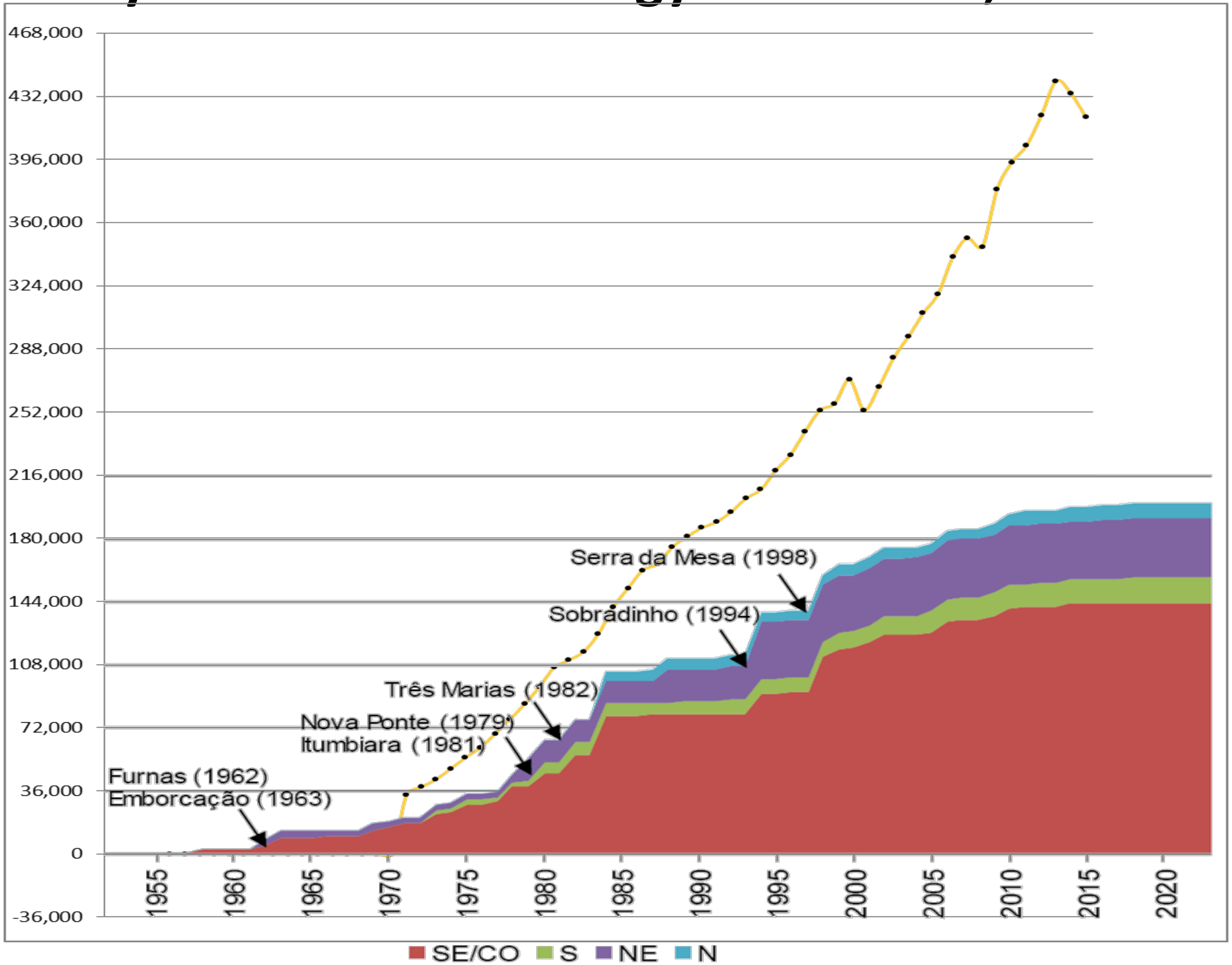



ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico
Diagrama Esquemático das Usinas Hidroelétricas do SIN
Usinas Hidroelétricas Despachadas pelo ONS na Otimização da Operação Eletroenergética do Sistema Interligado Nacional
Horizonte: 2018 - 2022
Potência Instalada
31 Dez | Hidroelétrica(*) (MW) | Percentual do SIN (*)
2017 | 93.323 | 62,9
2018 | 96.567 | 62,4
2019 | 99.964 | 62,5
2020 | 101.797 | 62,1
2021 | 101.797 | 61,6
2022 | 101.859 | 61,6
(*) Valores sujeitos a alteração em função da evolução do cronograma de expansão do sistema.
Bacias Hidrográficas
Código de cores das usinas
Amazonas
Atlântico NE Ocidental
Atlântico NE Oriental
Parnaíba
Tocantins-Araguaia
São Francisco
Atlântico Leste
Atlântico Sudeste
Atlântico Sul
Paraguai
Paraná
Uruguai
Legenda
Usina com Reservatório
Usina com Reservatório Futura
Usina a Fio d'Água
Usina a Fio d'Água Futura
Usina em Construção
Reservatório
Usina de Bombeamento
Planejamento da Operação Energética
Legenda
Aproveitamentos Existentes
69 com reservatório
85 a fio d'água
4 bombeamento
Usinas Futuras / em Construção
1 com reservatório
4 a fio d'água
163 aproveitamentos
Agentes
CDSA - 1
CEEE - 2
CEC - 3
Sta Branca - 4
CESC - 5
CEMIG - 6
CERAN - 7
CESP - 8
Rio Paranapanema - 9
AES-Tietê - 10
CHESF - 11
COPEL - 12
Eletronorte - 13
EMAE - 14
Energest - 15
Furnas - 16
Engie - 17
Itaipu Binacional - 18
Light - 19
GERDAU - 20
Foz do Rio Claro - 21
Rio Canoas - 22
Baguari - 23
CBA - 24
Cachoeira Energia - 25
CESAP - 26
Vot. Energia - 27
Paraibuna - 28
Porto Estrela - 29
SEFAC - 30
Corumbá IV - 31
CPFL - 32
CVRD - 33
Eletrosul - 34
Corumbá III - 35
Águas da Pedra - 36
Celg GT - 37
Investco - 38
Itapebi - 39
Brookfield - 40
J. Malucelli - 41
Monel - 42
Retiro Baixo - 43
Ijuí - 44
Queiroz Galvão - 45
Rio Verde - 46
ENEL - 47
Tangará - 48
Votorantim - 49
Alupar - 50
Foz do Chapecó - 51
NC Energia - 52
Santo Antônio - 53
Energia Sustentável - 54
Eletrogóes - 55
Amazonas Energia - 56
EDP - 57
Rio Paraná - 58
Tijoá - 59
Fontes das Informações
Bacia do Paranaíba
Bacia do Grande
Bacia do Tietê
Bacia do Paraguai
Bacia do Paranapanema
Bacia do Iguaçu
OCEANO ATLÂNTICO
Janeiro 2018

Brazil Electricity Production x Consumption GWh

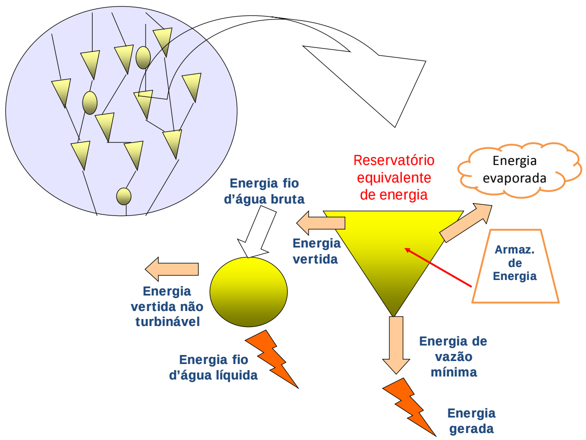


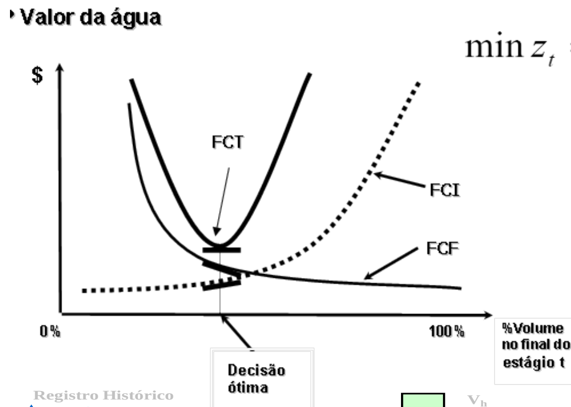
SIN – History: EARmax and Energy Production, GWh



Source: FALCETTA, 2015: 141 Usinas existentes + 29 Usinas previstas

Newave Software – Stochastic Dual Dynamics Process

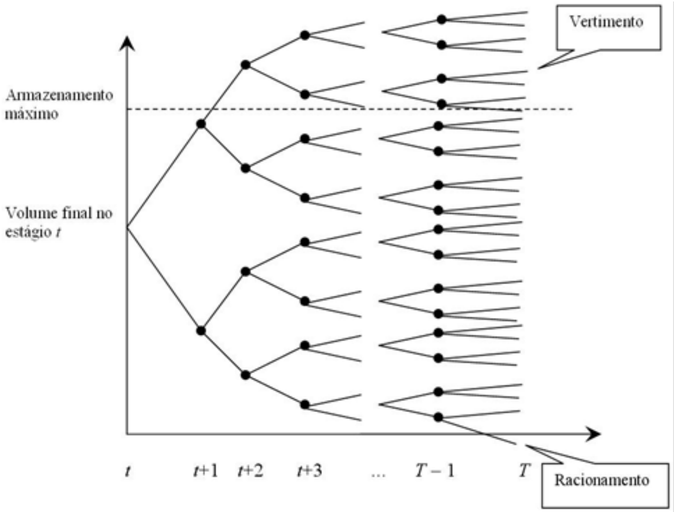


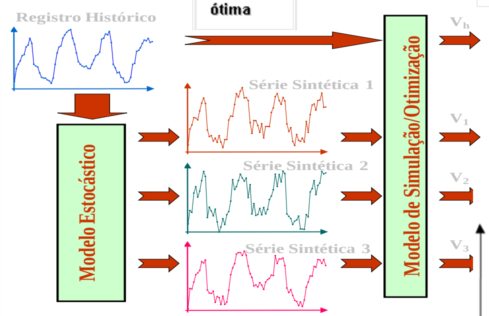


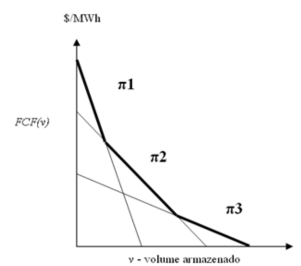
$$\min z_t = \min\left\{\sum_{j=1}^{J} c_j g_{j,t} + \frac{1}{1+\beta} FCF(v_{t+1})\right\}$$

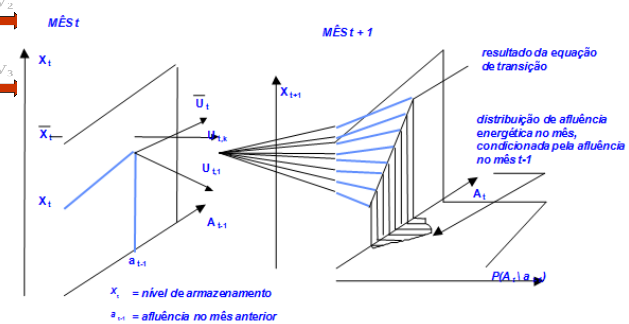
$$\sum_{j=1}^{J} g_{j,t} + \sum_{i=1}^{I} \rho_i u_{i,t} = d_h$$

$$\underline{G}_h \leq G_h \leq \overline{G}_h$$

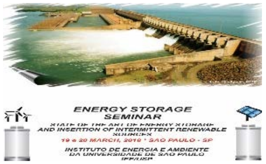








Source: Rodrigues, 2009 apud Medeiros 2003; Kelman, 1999; Maceira et al., 1999; Ramos, 2009; Pereira& Pinto, 1995; Gorestin et al 1992 e 1993; Pereira 1999 .



Newave – Periodic Autoregressive Model

$$\left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = \phi_1^m \left(\frac{Z_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \ldots + \phi_p^m \left(\frac{Z_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}}\right) + a_t$$

ou, resumidamente

$$\Phi^m(B)\left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = a_t$$

Z_t stocastic process;

μ_m seasonal average of time period m;

σ_m seasonal standard deviation of the time period m;

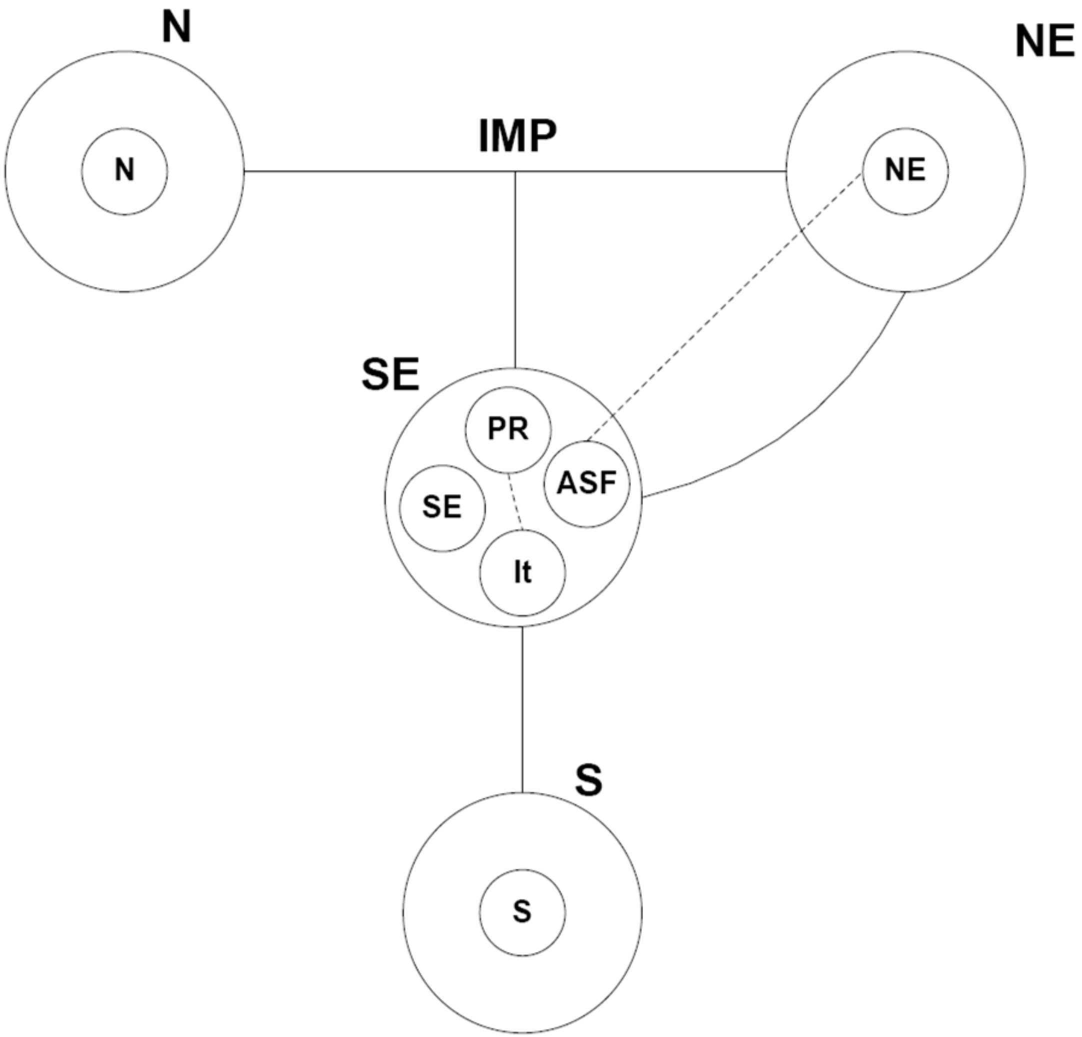
$\Phi^m(B)$ autoregressive operator of p_m order;

p_m é a autoregressive order of the period m;

a_t é serial time noise, independent, zero average and variance = $\sigma_a^{2(m)}$.

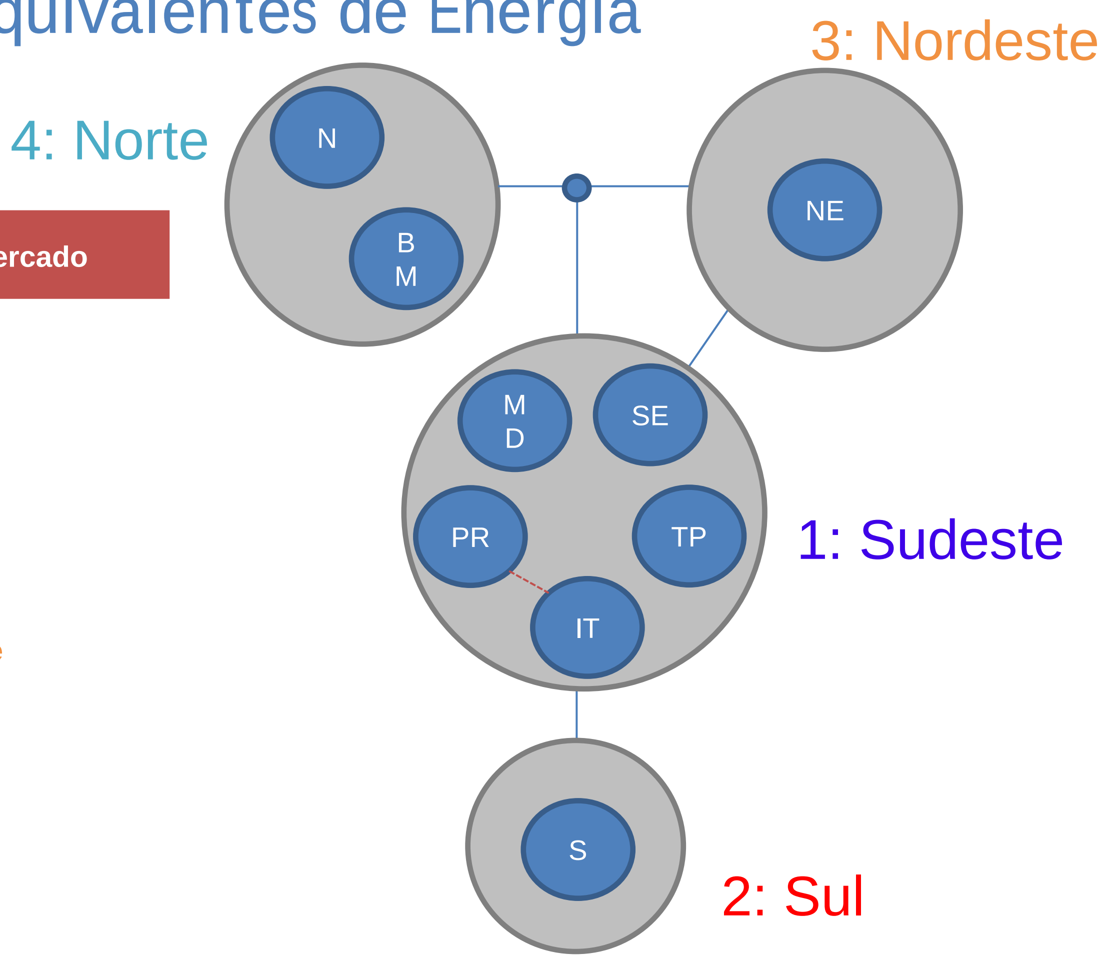
Source: MACEIRA et al., 1999b

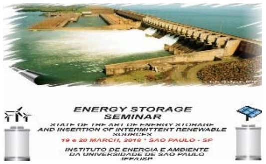
Hydraulic coupling between REEs Alto São Francisco and Northeast, and between REEs Paraná and Itaipu



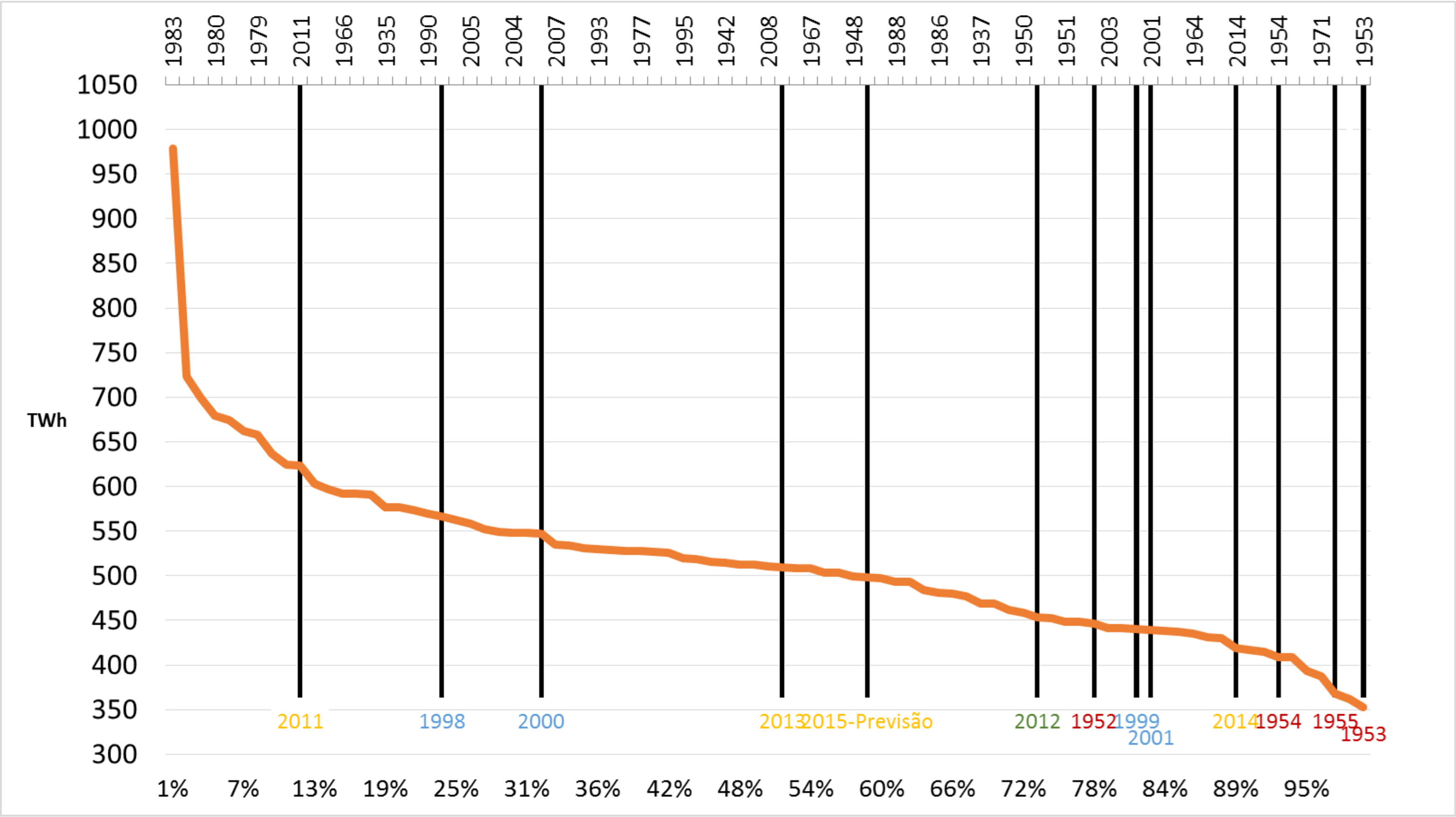
Newave: Reservatórios Equivalentes de Energia

Reservatório Equivalente	Nome	Submercado
1	Sudeste	1: Sudeste
5	Itaipu	1: Sudeste
6	Madeira	1: Sudeste
7	Teles Pires	1: Sudeste
10	Paraná	1: Sudeste
2	Sul	2: Sul
3	Nordeste	3: Nordeste
4	Norte	4: Norte
8	Belo Monte	4: Norte



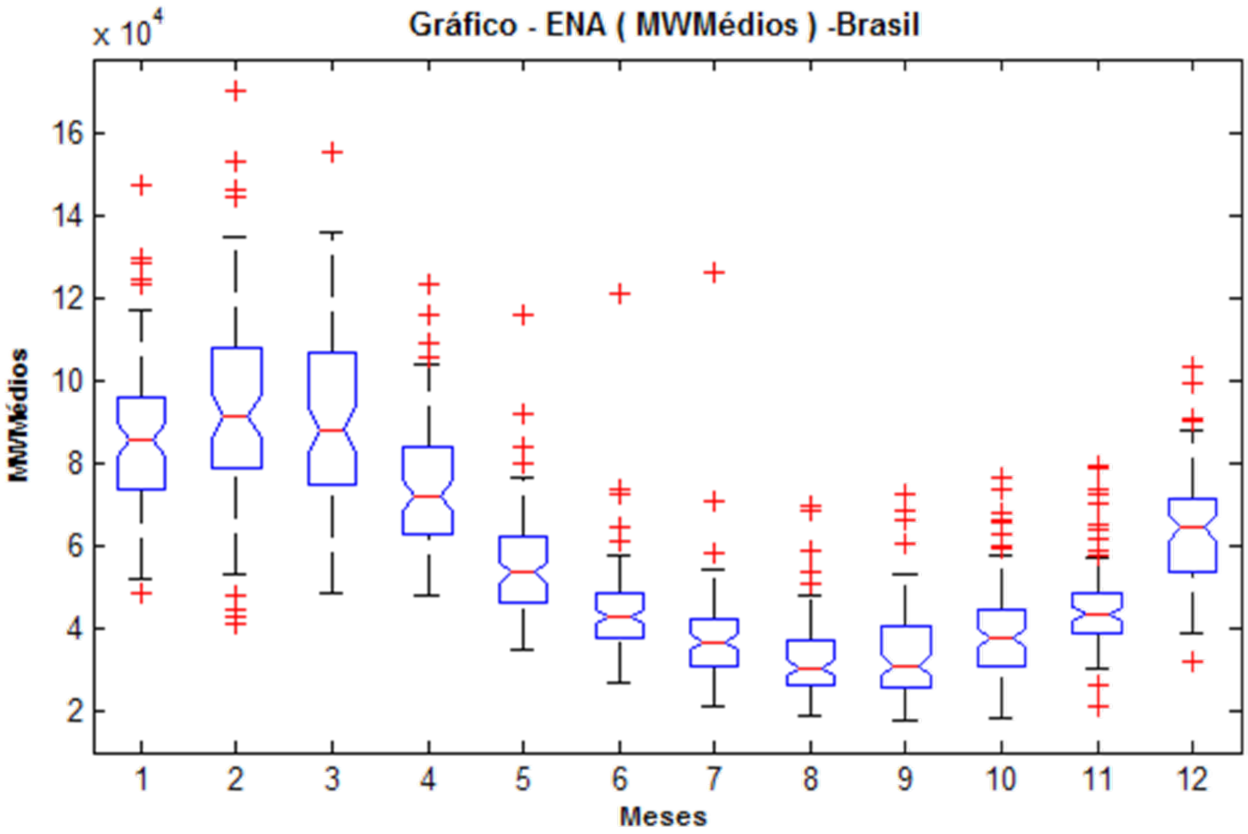


BRAZIL – NATURAL ENERGY INFLOW, TWh

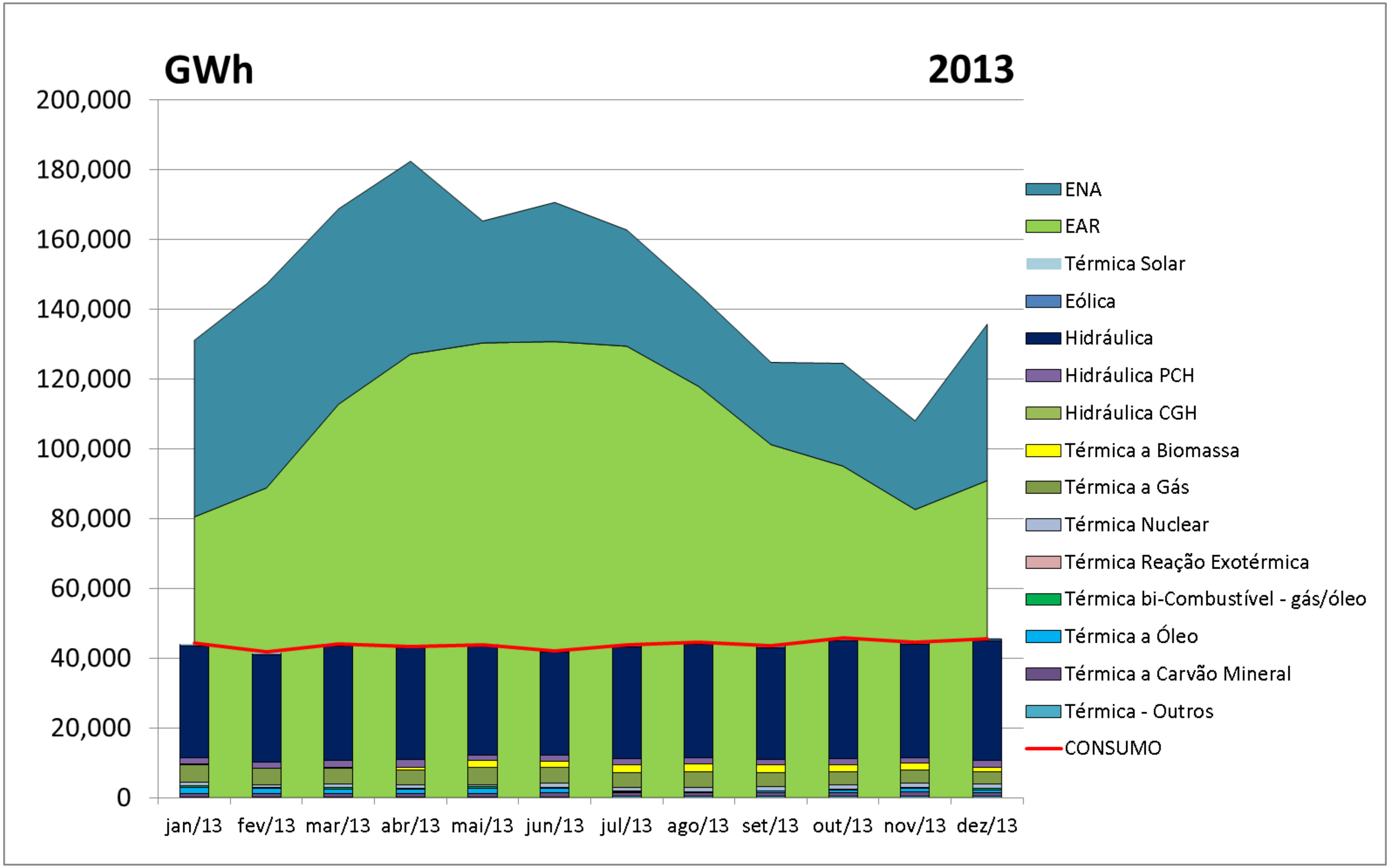


Elaborado por Alcantaro Lemes Rodrigues. Fonte de Dados: ONS, 2015

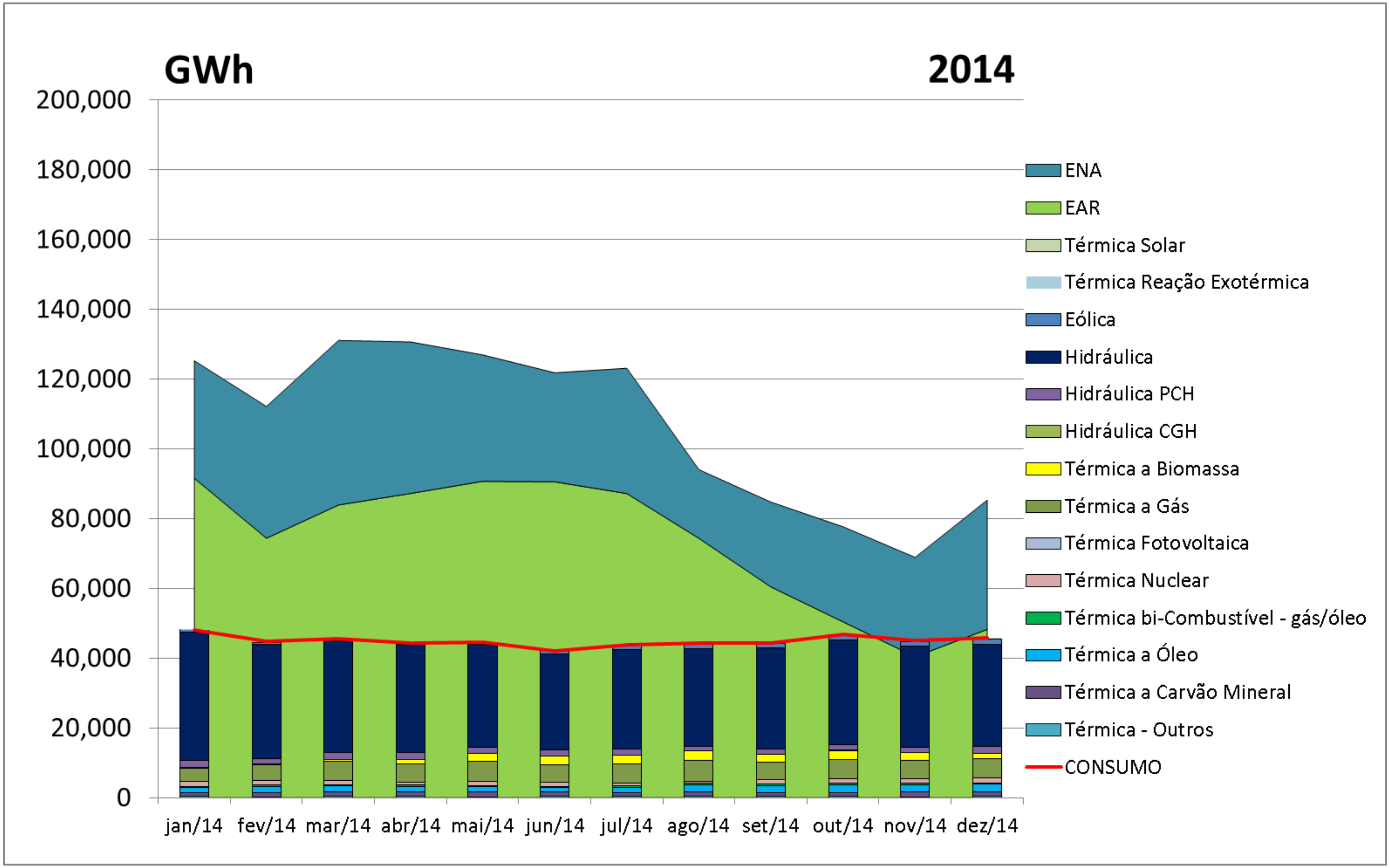
Brazil – Afluentg Natural Energy – Boxplot

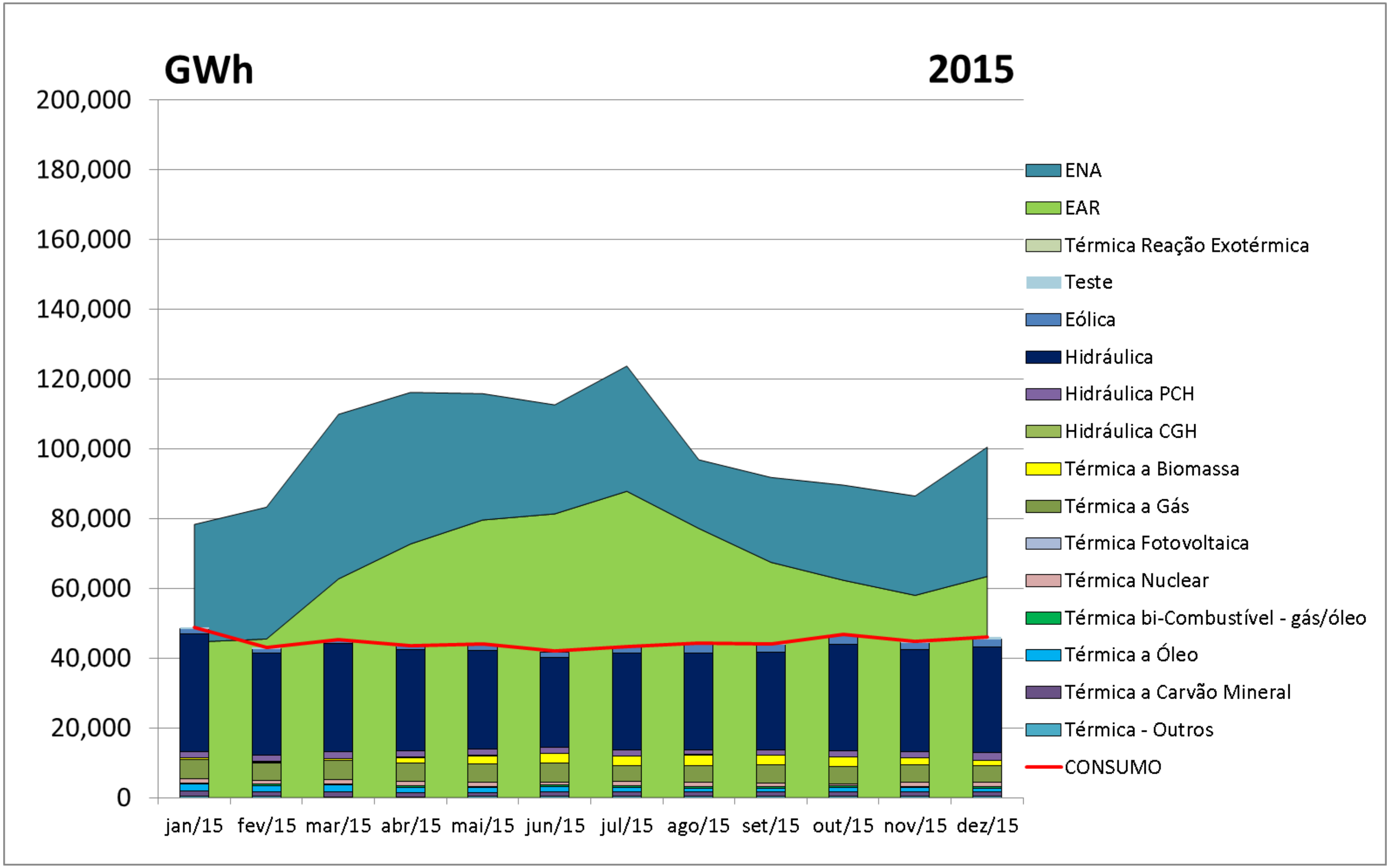


Boxplot - 1931 a 2014 – MWMÉDIOS
Author: Alcantaro Lemes Rodrigues. Datasource: ONS, 2014

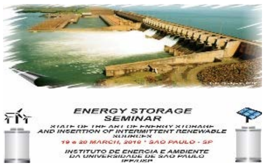


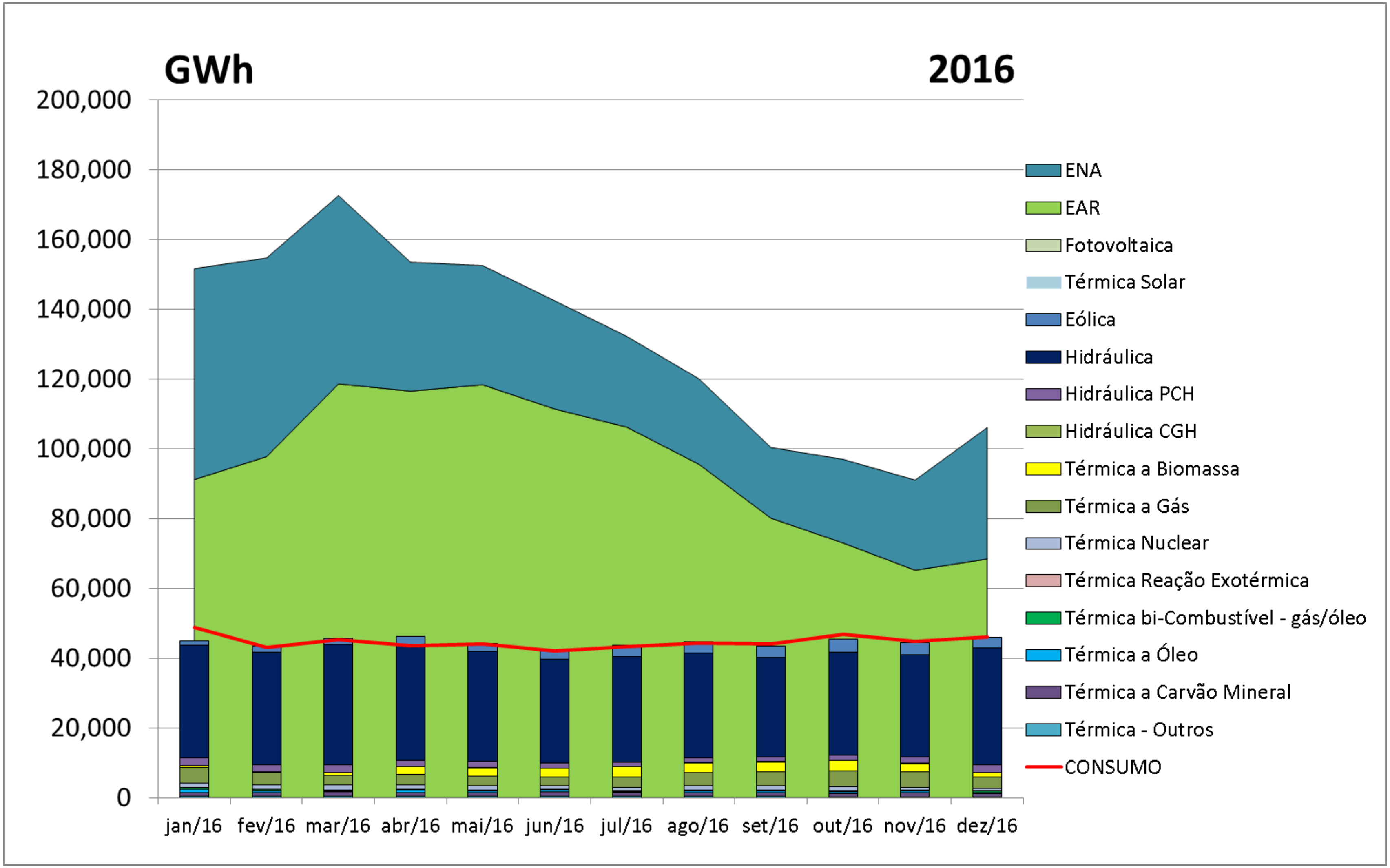
GWh
2013
200,000
180,000
160,000
140,000
120,000
100,000
80,000
60,000
40,000
20,000
0
jan/13
fev/13
mar/13
abr/13
mai/13
jun/13
jul/13
ago/13
set/13
out/13
nov/13
dez/13
ENA
EAR
Térmica Solar
Eólica
Hidráulica
Hidráulica PCH
Hidráulica CGH
Térmica a Biomassa
Térmica a Gás
Térmica Nuclear
Térmica Reação Exotérmica
Térmica bi-Combustível - gás/óleo
Térmica a Óleo
Térmica a Carvão Mineral
Térmica - Outros
CONSUMO

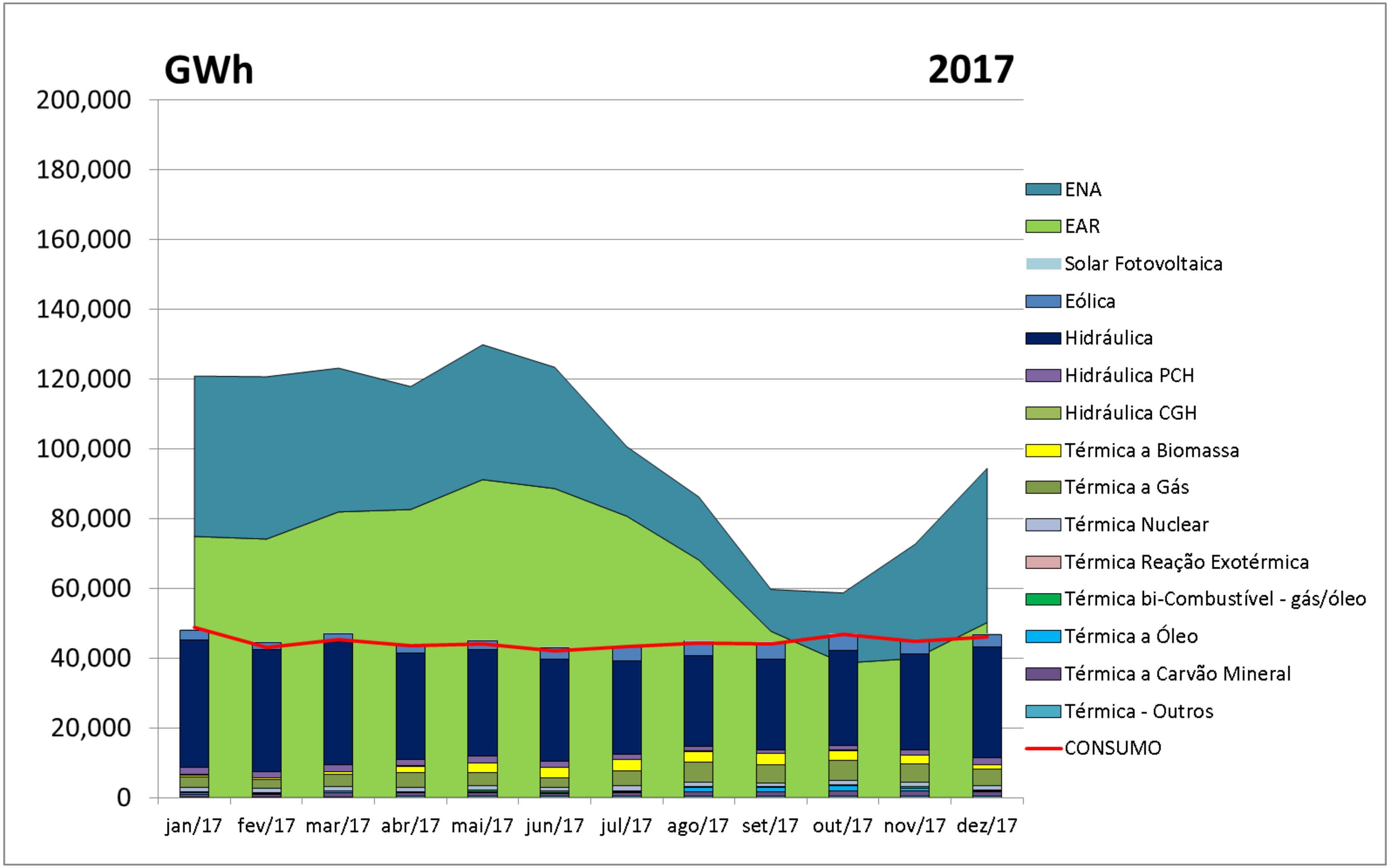

GWh
2014
200,000
180,000
160,000
140,000
120,000
100,000
80,000
60,000
40,000
20,000
0
jan/14
fev/14
mar/14
abr/14
mai/14
jun/14
jul/14
ago/14
set/14
out/14
nov/14
dez/14
ENA
EAR
Térmica Solar
Térmica Reação Exotérmica
Eólica
Hidráulica
Hidráulica PCH
Hidráulica CGH
Térmica a Biomassa
Térmica a Gás
Térmica Fotovoltaica
Térmica Nuclear
Térmica bi-Combustível - gás/óleo
Térmica a Óleo
Térmica a Carvão Mineral
Térmica - Outros
CONSUMO

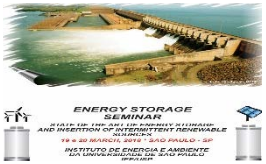

GWh
2015
200,000
180,000
160,000
140,000
120,000
100,000
80,000
60,000
40,000
20,000
0
jan/15
fev/15
mar/15
abr/15
mai/15
jun/15
jul/15
ago/15
set/15
out/15
nov/15
dez/15
ENA
EAR
Térmica Reação Exotérmica
Teste
Eólica
Hidráulica
Hidráulica PCH
Hidráulica CGH
Térmica a Biomassa
Térmica a Gás
Térmica Fotovoltaica
Térmica Nuclear
Térmica bi-Combustível - gás/óleo
Térmica a Óleo
Térmica a Carvão Mineral
Térmica - Outros
CONSUMO

IEE USP
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO






GWh
2017
200,000
180,000
160,000
140,000
120,000
100,000
80,000
60,000
40,000
20,000
0
jan/17
fev/17
mar/17
abr/17
mai/17
jun/17
jul/17
ago/17
set/17
out/17
nov/17
dez/17
ENA
EAR
Solar Fotovoltaica
Eólica
Hidráulica
Hidráulica PCH
Hidráulica CGH
Térmica a Biomassa
Térmica a Gás
Térmica Nuclear
Térmica Reação Exotérmica
Térmica bi-Combustível - gás/óleo
Térmica a Óleo
Térmica a Carvão Mineral
Térmica - Outros
CONSUMO

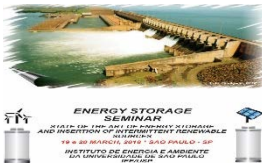


VARIABILIDADE DA GERAÇÃO NO NORDESTE

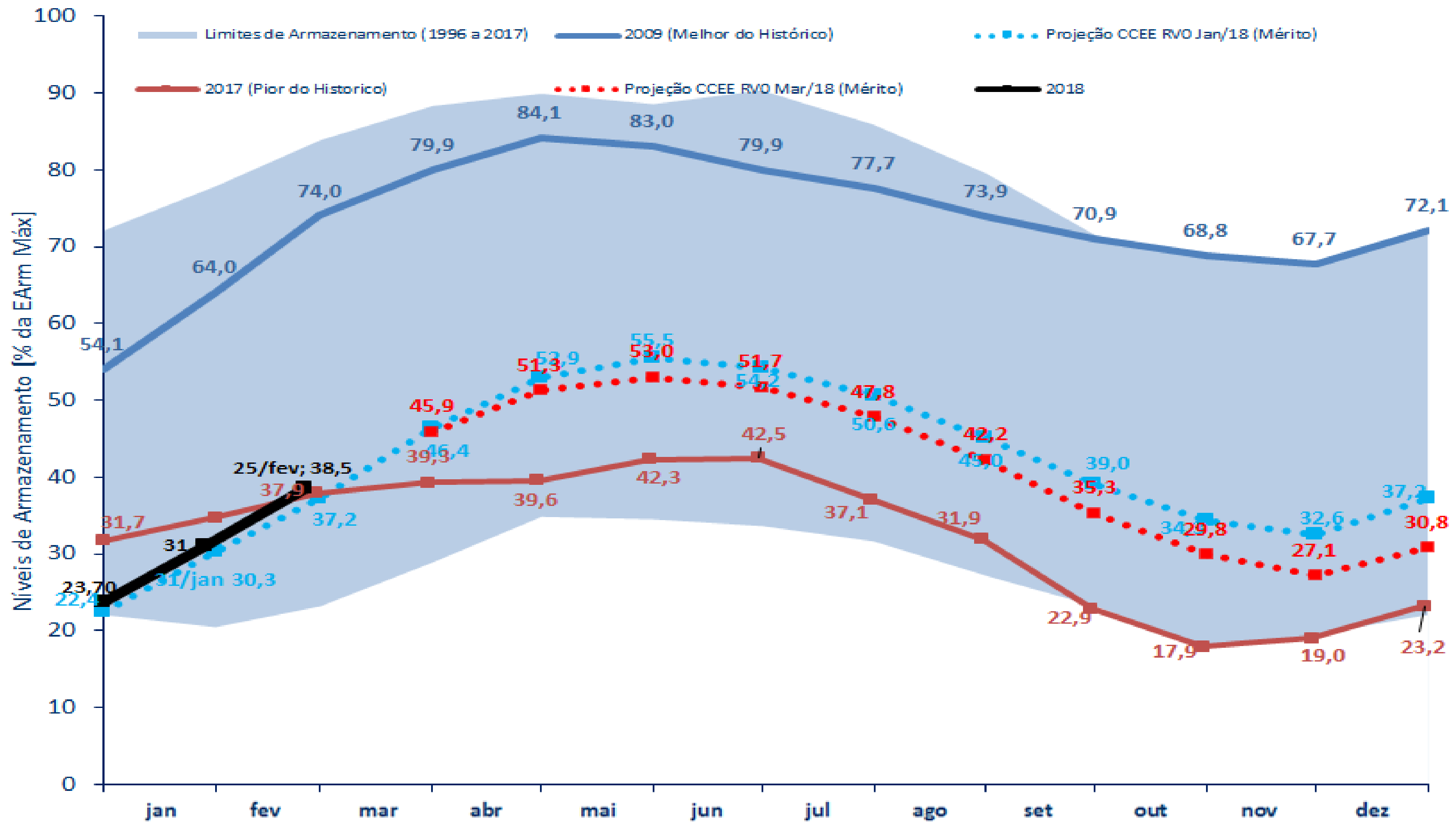
- A variabilidade da velocidade do vento causa diferenças na geração eólica diária, com variações de 1500 MWm para 4500 MWm de um dia para o outro, em outubro de 2016, por exemplo.

- A variabilidade da velocidade do vento causa diferenças na geração eólica diária, com variações de 1500 MWm para 4500 MWm de um dia para o outro, em outubro de 2016, por exemplo.

IEE USP
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

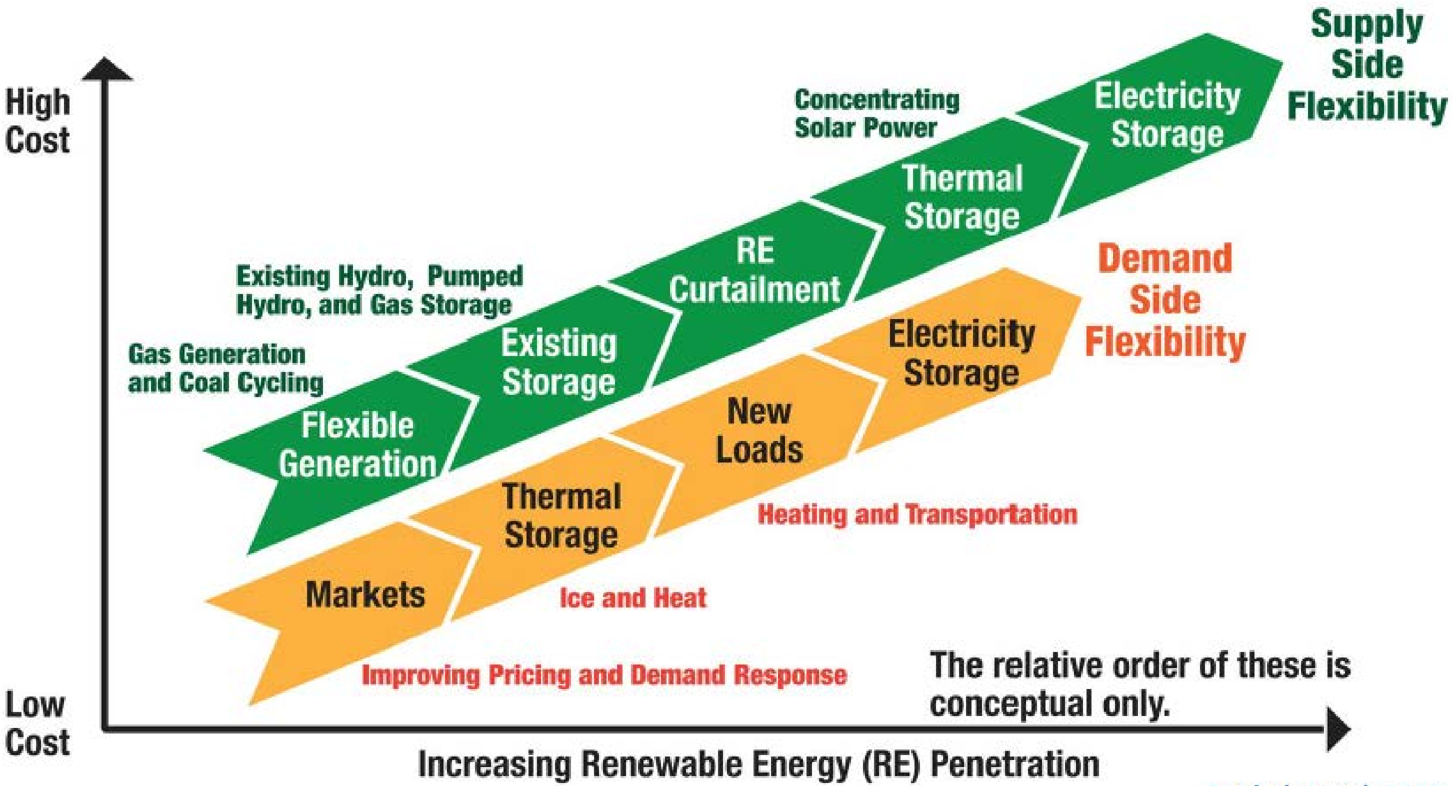


Water Storage - National Interconnected System



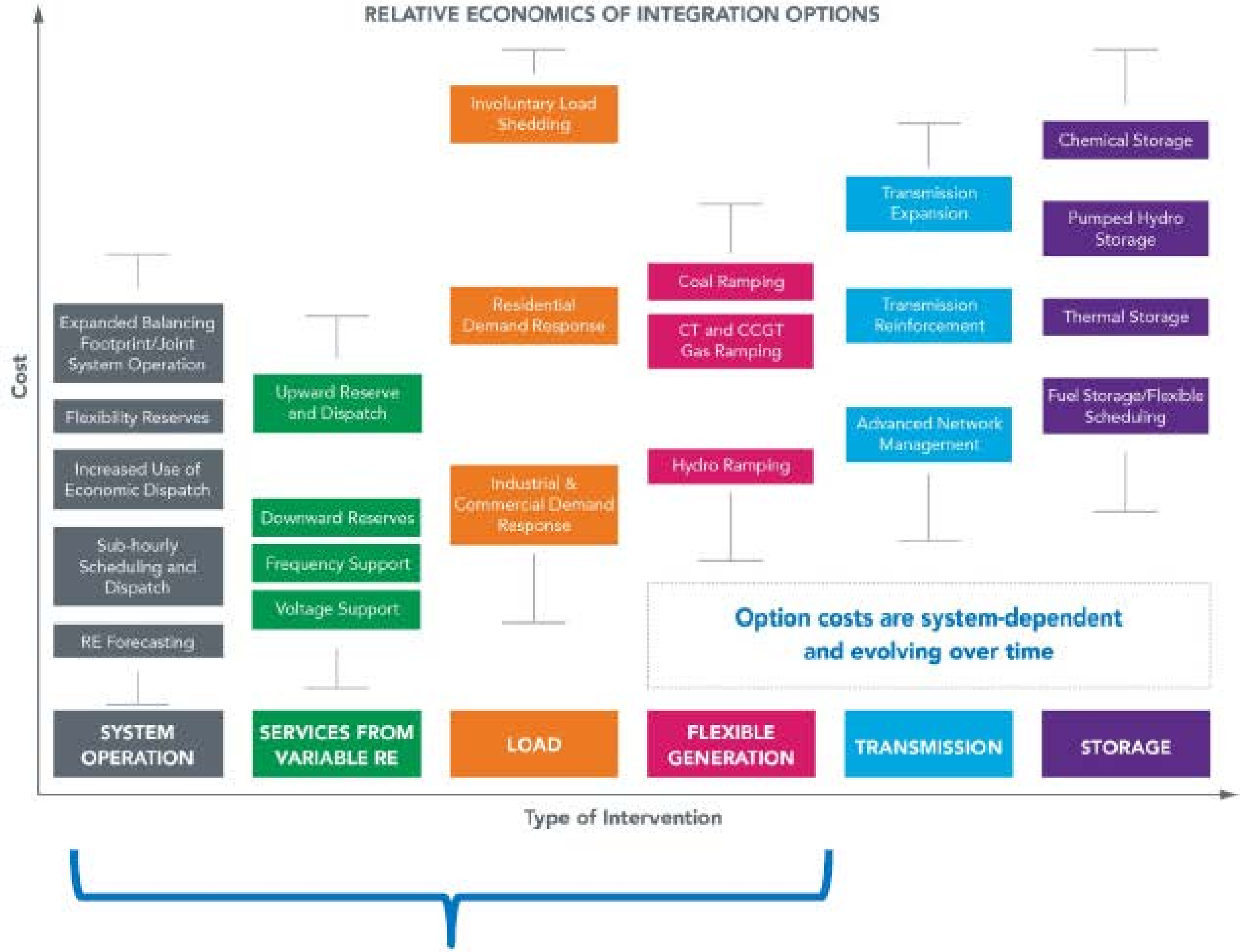
Source: ONS e CCEE(2018)

Flexibility Supply Curve Concept



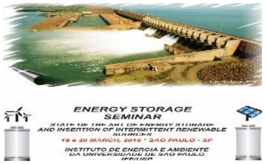
Denholm et al. 2010

Flexibility Supply Curve Concept



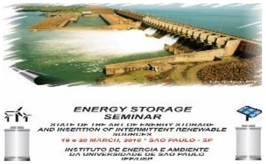
You probably do this first

Cochran et al. 2015



PERGUNTAS

- QUANTO DE FONTES INTERMITENTES (GERAÇÃO VARIÁVEL) PODEMOS ADICIONAR, UTILIZANDO AS FONTES DE FLEXIBILIDADE ATUAIS?
- QUE NOVAS FONTES (ALTERNATIVAS DE FLEXIBILIDADE SERÃO ADEQUADAS, TÉCNICA E ECONOMICAMENTE, NO CONTEXTO DO SISTEMA INTERLIGADO BRASILEIRO?
- QUAIS AS ALTERAÇÕES NECESSÁRIAS NOS CRITÉRIOS DE OPERAÇÃO E DESPACHO?
- QUAL O MODELO ECONÔMICO, REGULATÓRIO, E DE REMUNERAÇÃO PARA AS FORMAS DE ARMAZENAMENTO REQUERIDOS?
- QUE O PAPEL DEVEM TER TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO MODERNAS, TAIS COMO ELETROQUÍMICO E HIDROGÊNIO, NO CONTEXTO BRASILEIRO?



THANK YOU

OBRIGADO!