



Workshop sobre modelos de previsão de demanda de Energia Elétrica

Modelos para previsão de carga no curtíssimo prazo

16/5/2018

José Francisco Moreira Pessanha

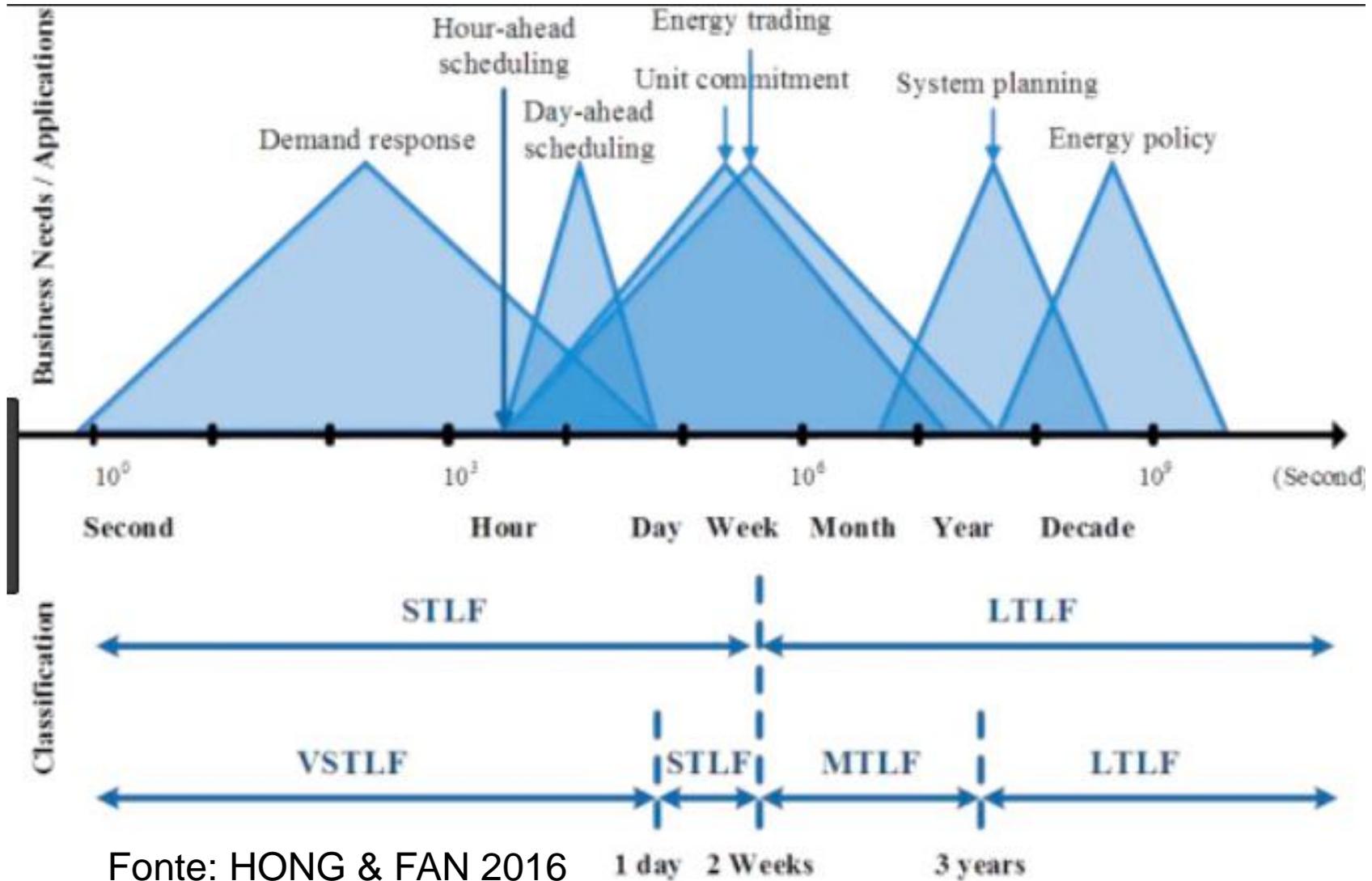
Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA

Informação fundamental em todas as etapas da operação de sistemas elétricos, desde o planejamento da operação, passando pela programação da operação até a operação em tempo real.

Abrange diferentes horizontes de previsão:

- **Curtíssimo prazo** (VSTLF - *Very Short Term Load Forecasting*), previsões horárias ou semi-horárias **até 1 dia à frente**
- **Curto prazo** (STLF - *Short Term Load Forecasting*) previsões diárias, horárias ou semi-horárias **até 1 semana à frente**
- **Médio prazo** (MTLF - *Medium Term Load Forecasting*) previsões semanais ou mensais **até 1 ano à frente**
- **Longo prazo** (LTLF - *Long Term Load Forecasting*), previsões anuais **além de 1 ano à frente**

CLASSIFICAÇÃO DA PREVISÃO DE CARGA SEGUNDO O HORIZONTE



Conta com uma variedade de métodos:

- **Métodos estatísticos:** Regressão Linear, Regressão Quantílica, Modelos Aditivos Generalizados, Métodos de Holt Winters, ARIMA, Modelos Estruturais, Modelos para Dados Funcionais, etc.
- **Métodos de aprendizagem de máquina (*machine learning*):** Redes Neurais Artificiais, Máquinas de Vetor de Suporte, Lógica Fuzzy, Redes Neuro-Fuzzy
- **Abordagens híbridas**

Projetos desenvolvidos e em desenvolvimento no Cepel

PCCP Previsor de Carga para o Curtíssimo Prazo

- previsão de carga para o tempo real
- previsões **até 48 horas** à frente com **resolução semi-horária**
- **Lógica Fuzzy (Algoritmo de Wang & Mendel)**

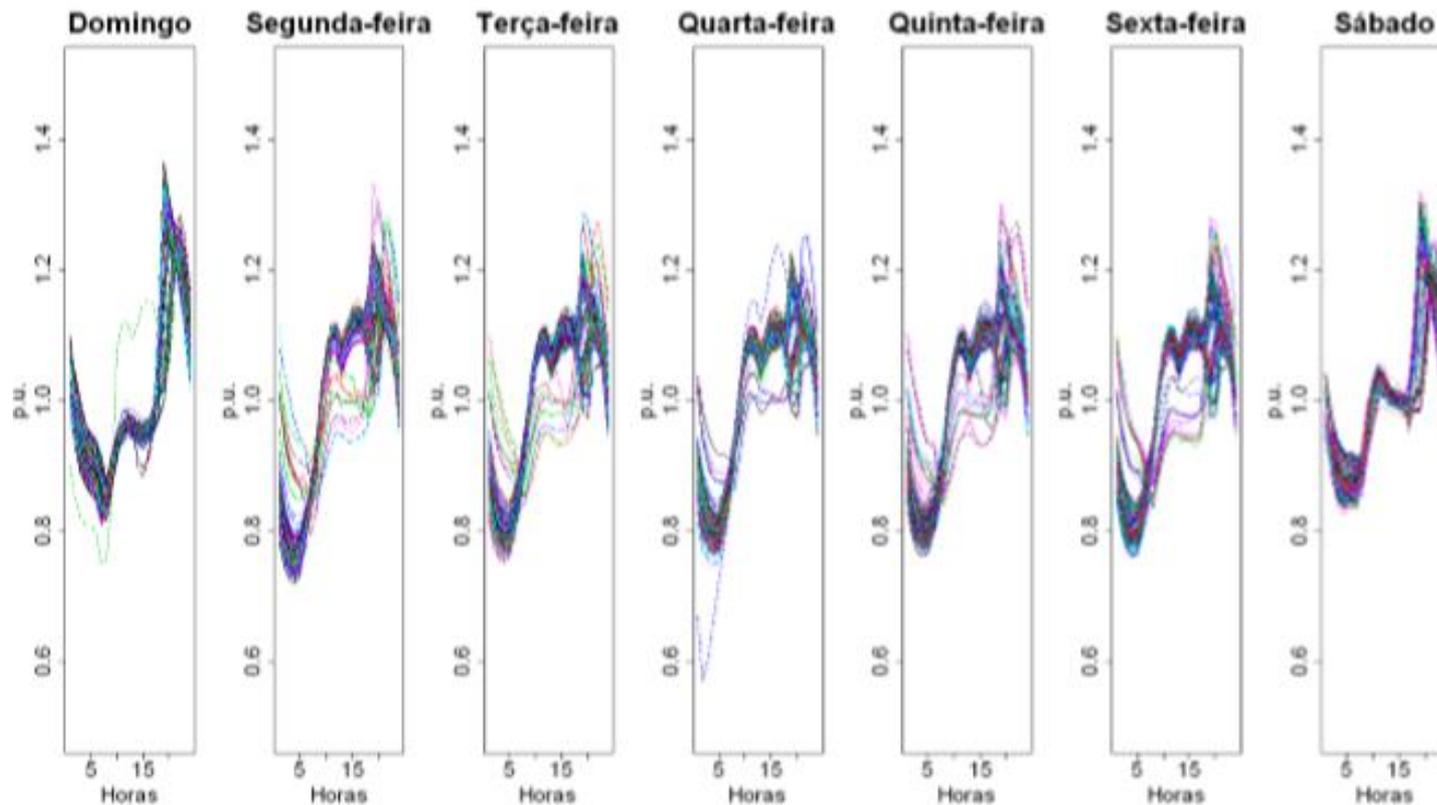
PrevCargaDESSEM Previsor de Carga para o DESSEM

- Previsão de carga **até 168 horas** à frente
- Previsões semi-horárias para os dois primeiros dias e por patamar de carga nos demais dias
- Máquinas de Vetor de Suporte (**Support Vector Regression**)

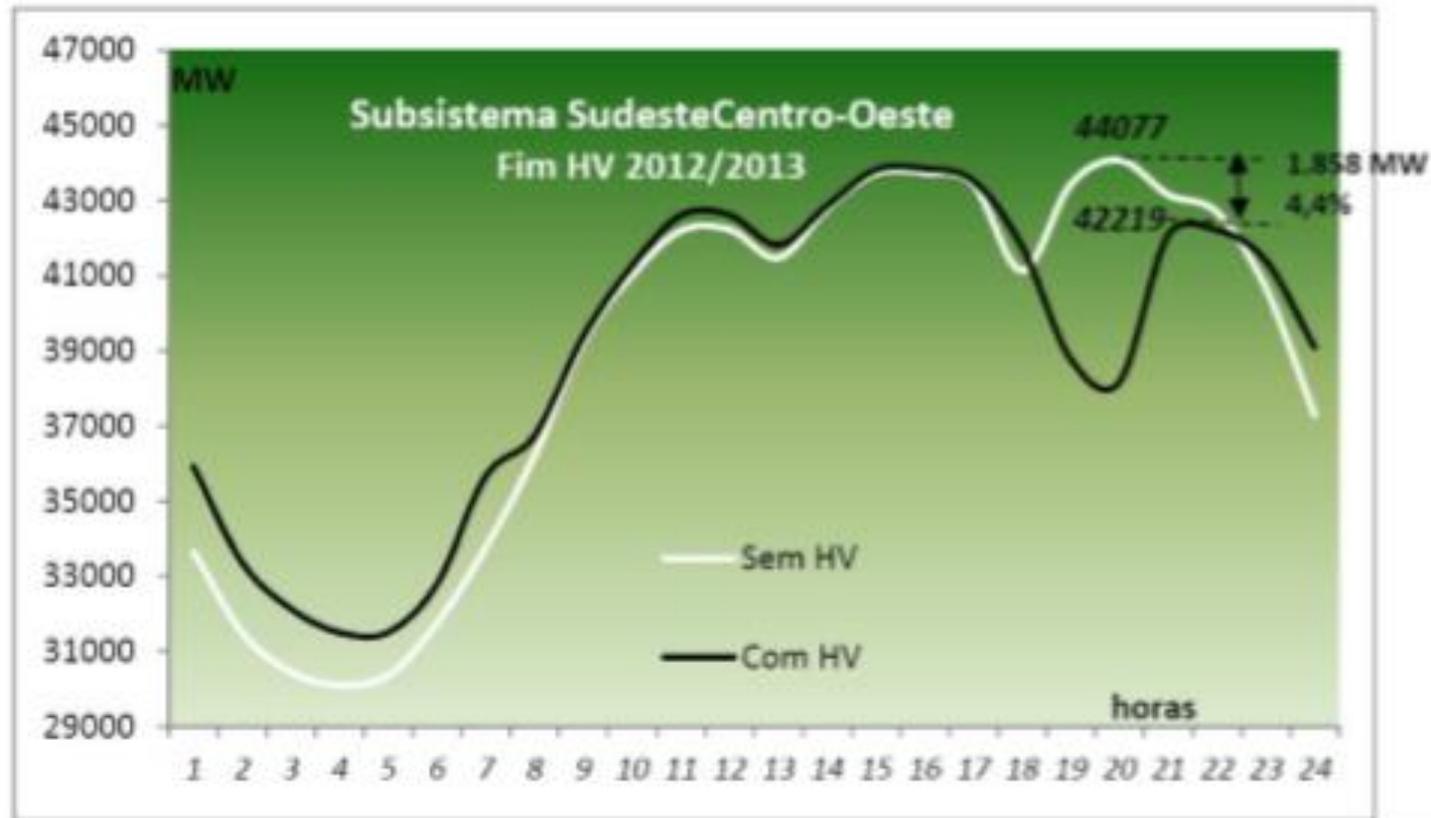
PrevCargaPMO Previsor de Carga para o Plano Mensal da Operação

- Previsão de carga **até 6 semanas** à frente **com resolução semanal**
- Máquinas de Vetor de Suporte (**Support Vector Regression**)

PERFIL DA CARGA POR DIA DA SEMANA

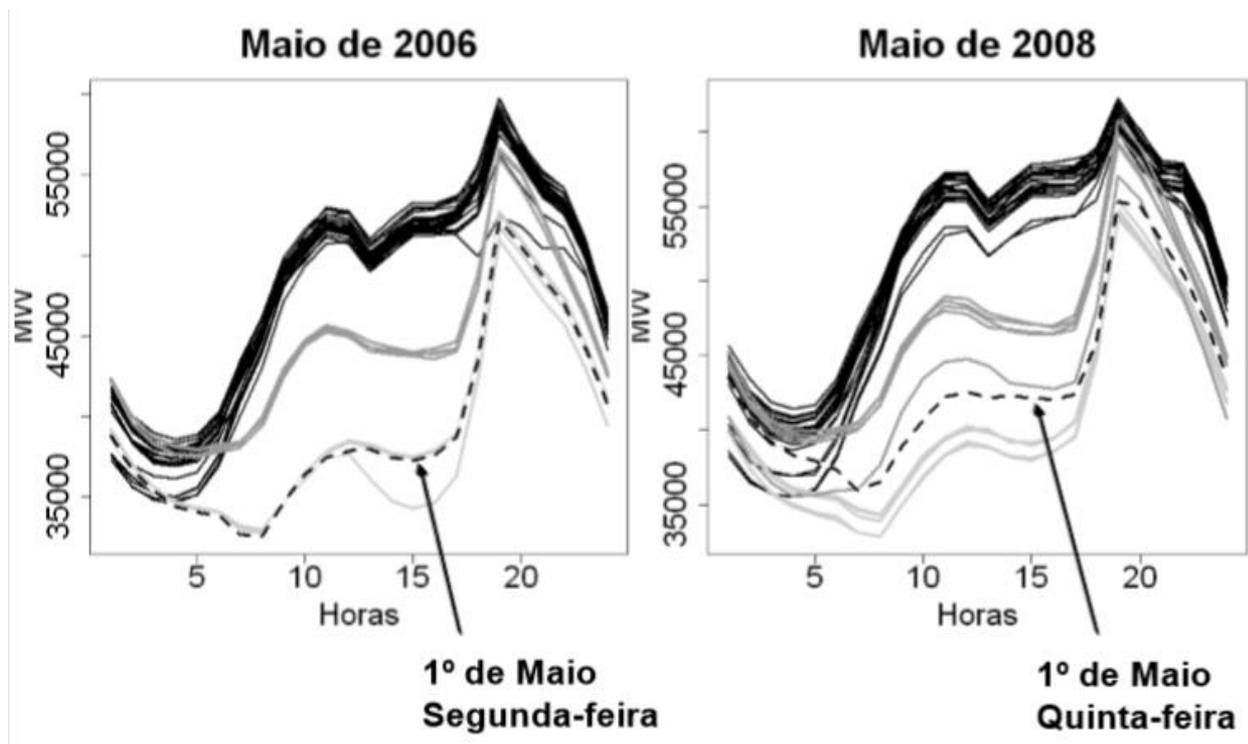


EFEITO DO HORÁRIO DE VERÃO

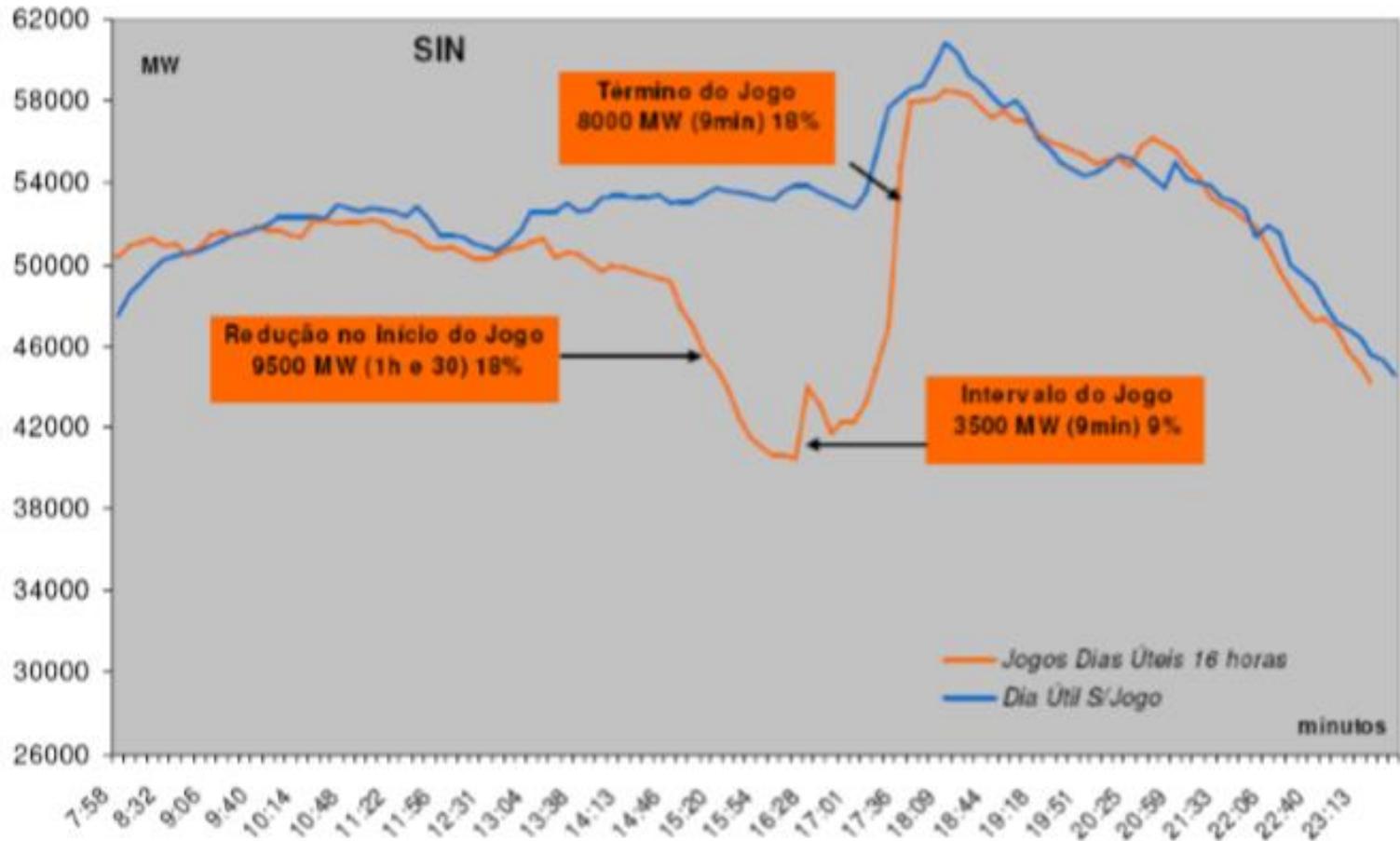


Fonte: ONS

PERFIL DA CARGA NO FERIADO

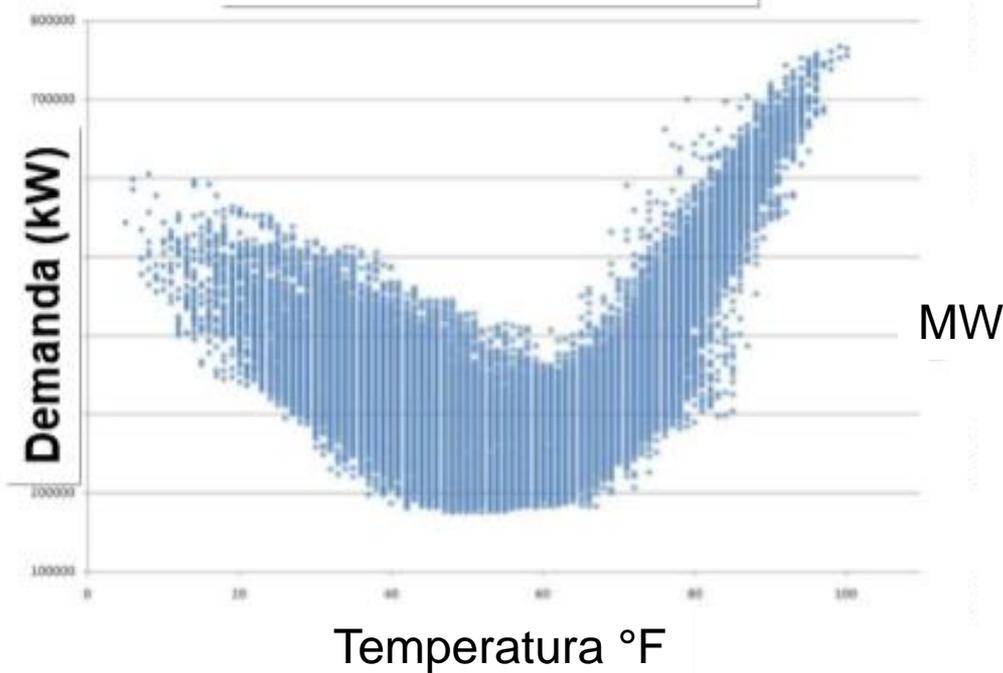


PERFIL DA CARGA NO DIA DE JOGO DA COPA (DIA ESPECIAL)

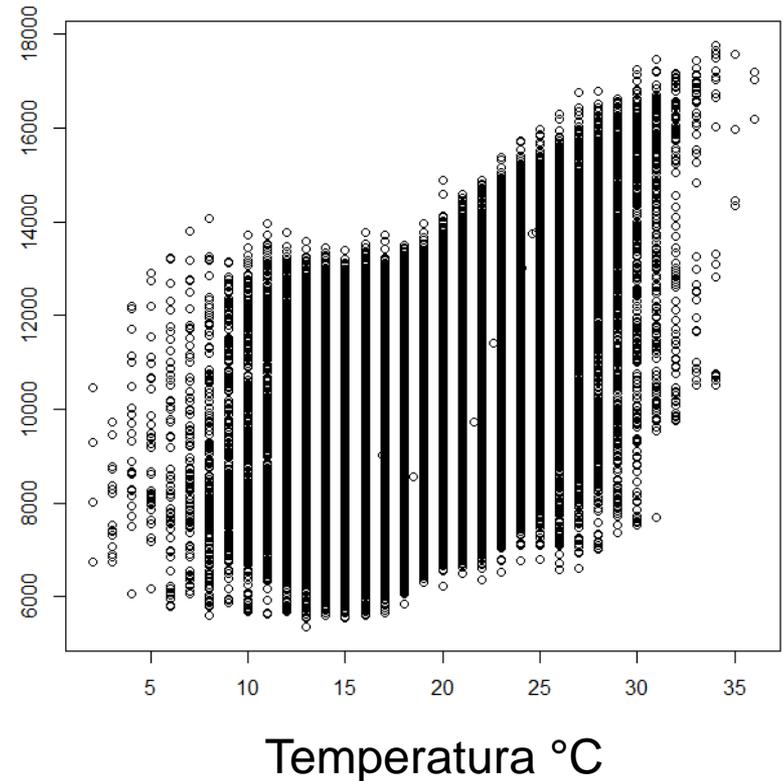


Fonte: ONS

Em uma área dos EUA



Subsistema SUL - SIN



Fonte: Hong, T, Wang, P., Williws, H.L. A naive multiple linear regression benchmark for short term load forecasting, Power and Energy Society General Meeting, IEEE, San Diego, 2011.

1) Variáveis de calendário:

Horas do dia

Dias da semana

Mês do dia da previsão

Horário de Verão/Horário Normal

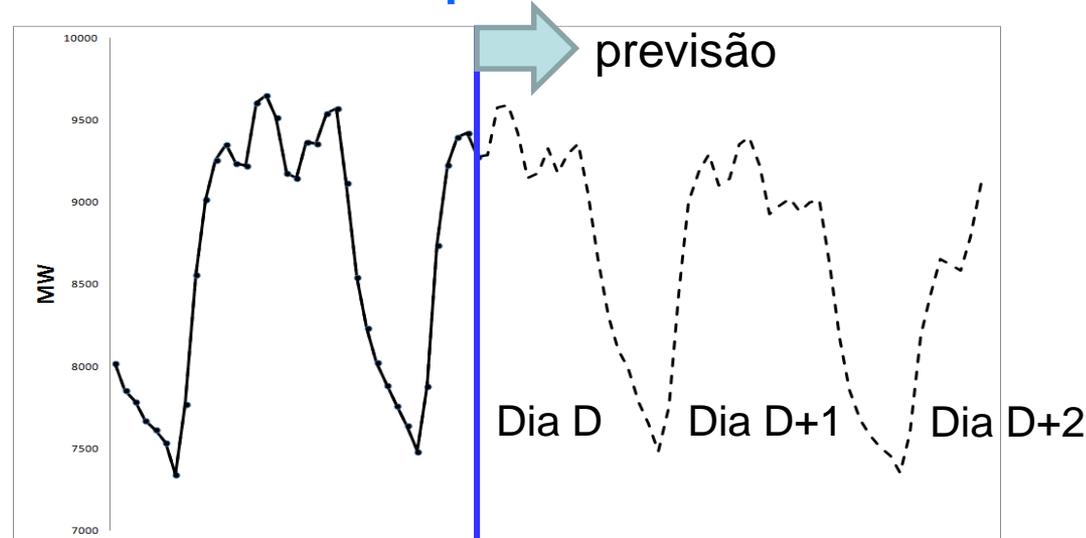
2) Feriados e dias especiais

3) Valores passados da carga

4) Previsão de temperatura

Objetivo

Prever a demanda média horária nas próximas 48 horas.

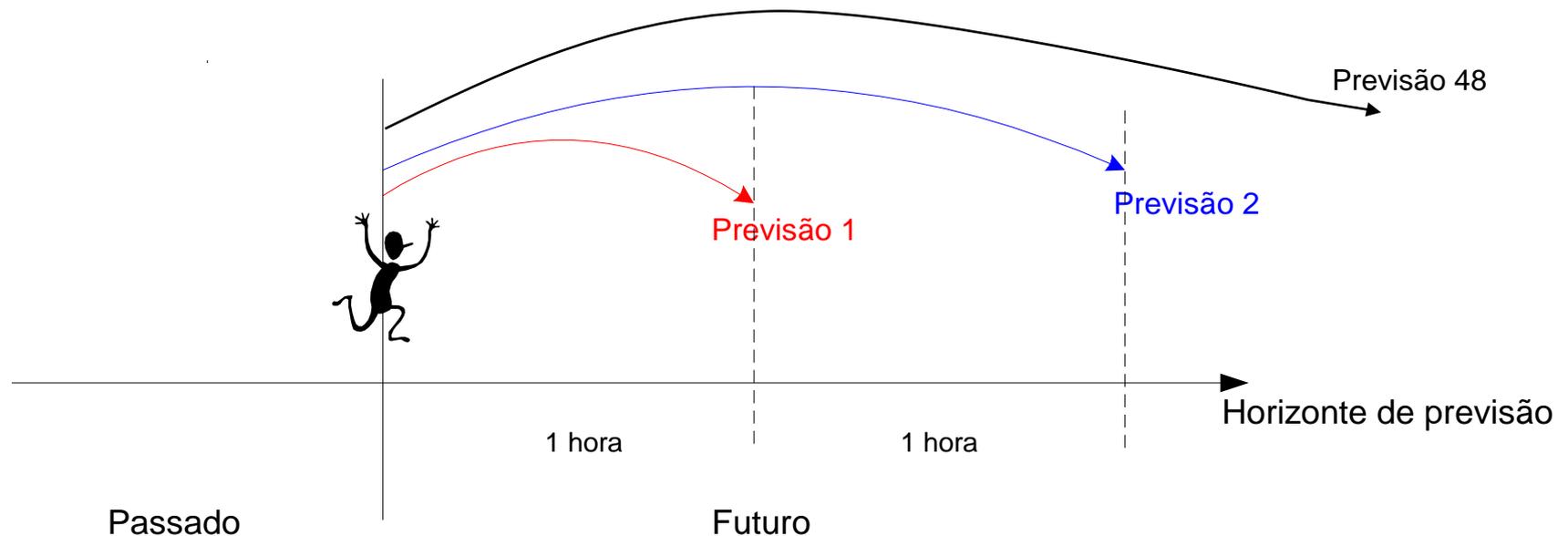


O que sabemos sobre o horizonte de previsão ?

- As datas dos dias D, D+1 e D+2 (dia da semana e mês)
- Os horários das previsões
- Se os dias D, D+1 e D+2 são dias normais ou feriados/dias especiais
- Se os dias D, D+1 e D+2 pertencem ao horário normal ou ao horário de verão.
- Previsões horárias de temperaturas
- Valores horários da carga até a hora h-1
- Valores passados da temperatura

- PCCP calcula a **previsão da taxa de crescimento da carga para cada hora do horizonte de previsão até 48 horas à frente ($\forall h=1,48$)**

$$\text{Previsão_MW}(T+h) = \text{Carga_MW}(T) \times \text{EXP}(\text{Previsão Tx. Cresc}(h))$$



- **Lógica Fuzzy (Modelo de Wang & Mendel, 1992)**
- **Previsões determinadas por regras fuzzy extraídas dos dados**
- **Conjuntos fuzzy gaussianos**

- **Regras fuzzy para cada mês, dia da semana, feriado/dia especial e hora do dia**

SE antecedente ENTÃO consequente

- **Modelo MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)**

- **Previsões atualizadas a cada hora**

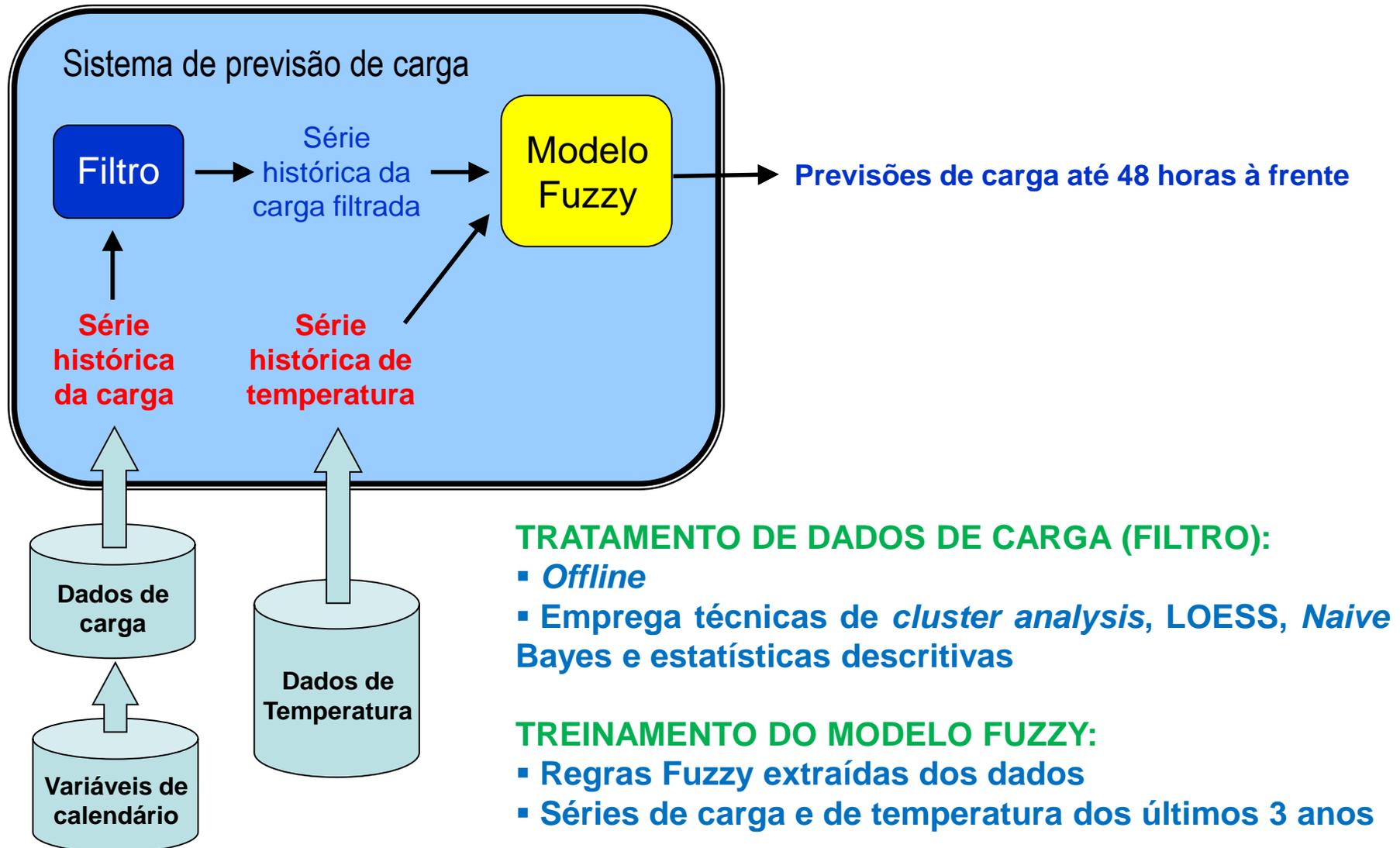
- **As previsões semi-horárias são obtidas por interpolação (DUBINSKY & ELPERIN, 1997)**

Variáveis no antecedente da regra fuzzy

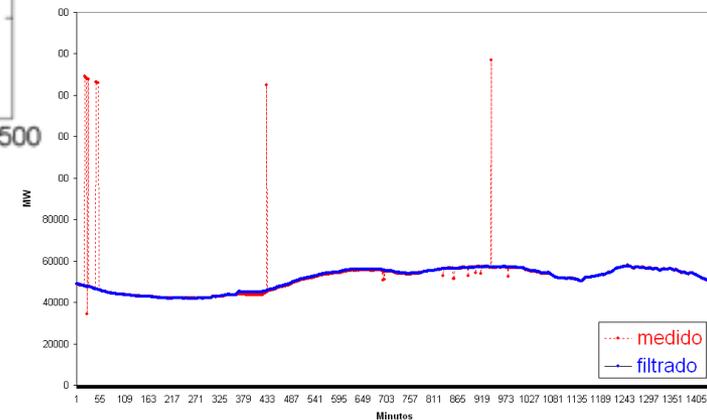
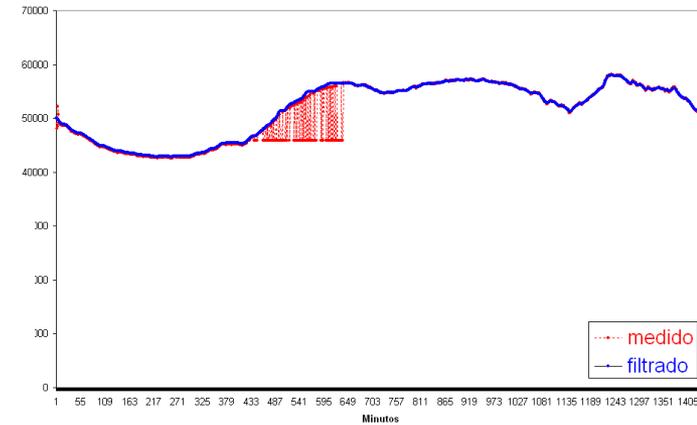
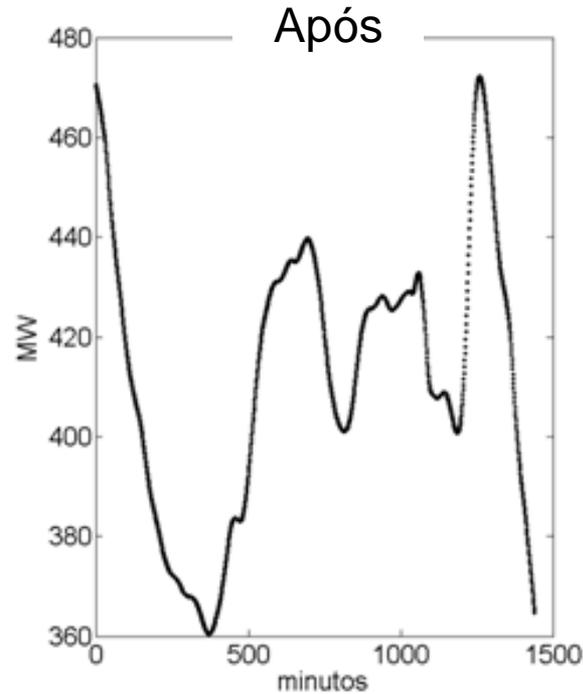
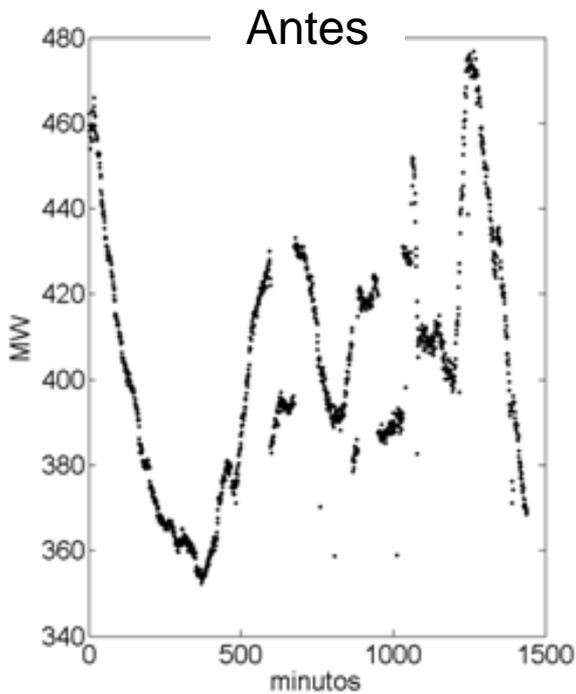
- Valores passados das tx. crescimento da demanda média horária
 $tx_{h-1}, tx_{h-2}, tx_{h-3}, tx_{h-120}, tx_{h-144}, tx_{h-168}$ Variáveis fuzzy
- Valores verificados da temperatura média horária
 $temp_{h-1}, temp_{h-6}, temp_{h-12}, temp_{h-24}$ Variáveis fuzzy
- Valores previstos da temperatura média horária
 $temp_h, temp_{h+1}, temp_{h+2}, \dots, temp_{h+48}$ Variáveis fuzzy
- Tipos dos dias D, D+1 e D+2 (normal, feriado ou dia especial) Variáveis crisp
- Horários dos dias D, D+1, D+2 (todos no horário de verão) Variáveis crisp
- Mês do dia da previsão Variável crisp

Variáveis no consequente da regra fuzzy

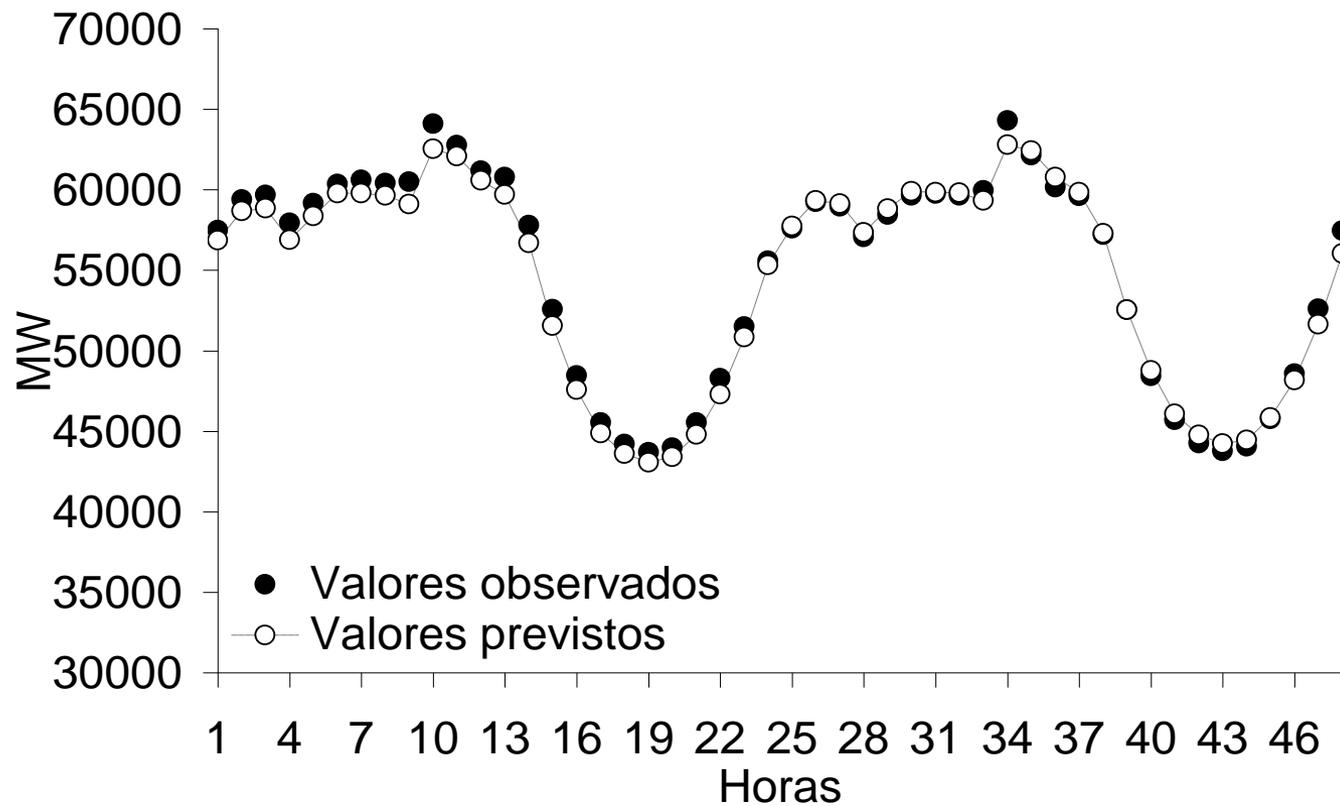
- Previsão das tx. crescimento acumuladas em cada hora do horizonte de previsão
 $tx_h, tx_{h+1}, tx_{h+2}, tx_{h+3}, \dots, tx_{h+48}$ Variáveis fuzzy

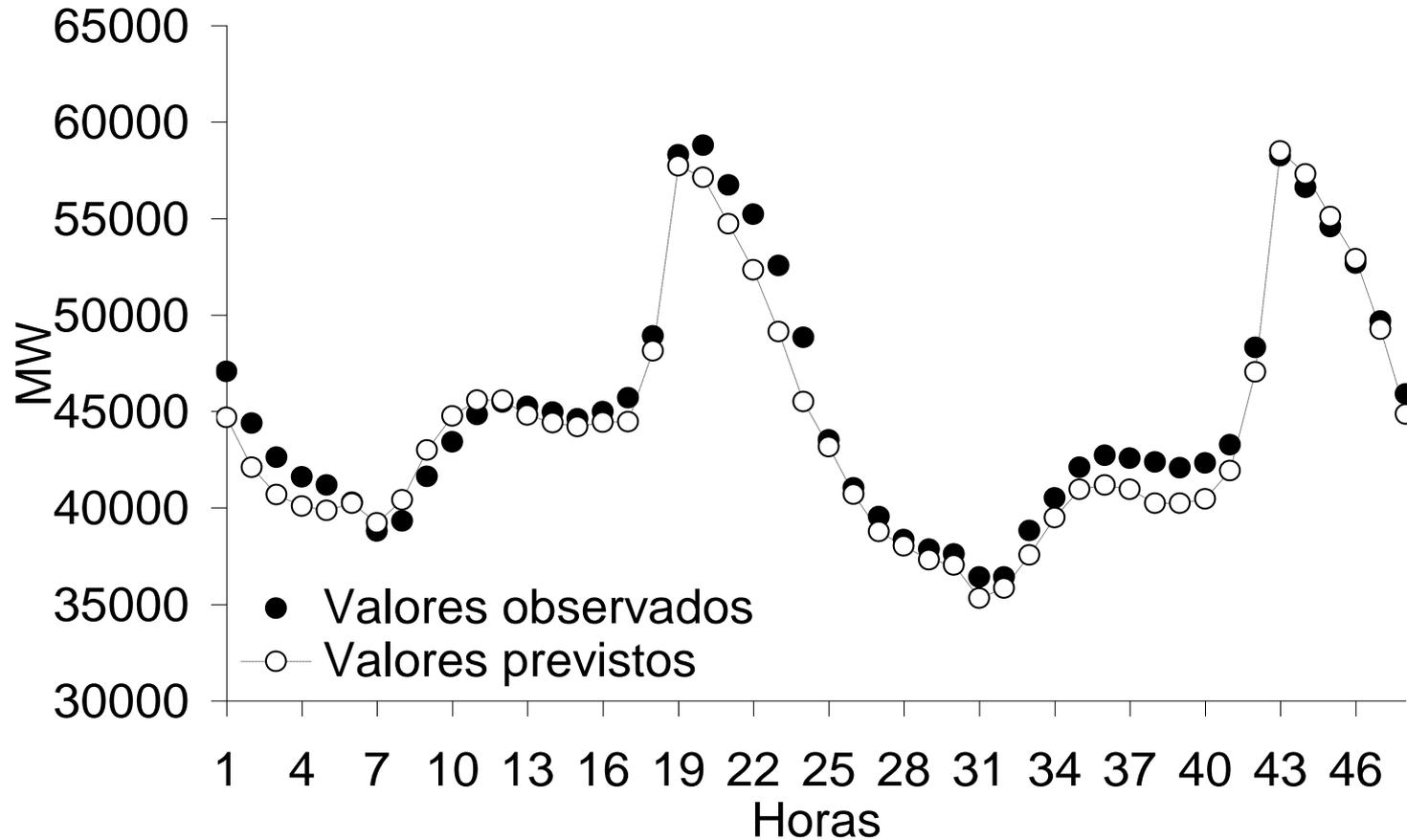


PCCP – Tratamento dos dados de carga (offline)



ALMEIDA et al (2016)
PESSANHA et al (2012)





- **Previsão de carga até 168 horas à frente**
- **Previsões com resolução semi-horária nas primeiras 48 horas e por patamar nas demais horas do horizonte de previsão**
- **Previsões atualizadas uma vez ao dia**
- **Previsões determinadas por *support vector regression* (CEPERIC et al, 2013)**

ETAPAS DA PREVISÃO NO PREVCARGADESSEM

- 1) Tratamento de dados de carga e temperatura
- 2) Previsão da **média diária da carga global em MW** até 7 dias à frente
- 3) Previsão do **perfil da carga global em p.u. da média diária** até 168 horas à frente
- 4) Previsão do **perfil de carga global em MW** até 168 horas à frente
- 5) Cálculo das **previsões semi-horárias em MW**
- 6) Cálculo das **previsões em patamares**

Dinâmica e Cronologia da previsão

	Sábado	Domingo	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	
D-1	D	D+1	D+2	D+3	D+4	D+5	D+6	FCF
	D-1	D	D+1	D+2	D+3	D+4	D+5	
		D-1	D	D+1	D+2	D+3	D+4	
			D-1	D	D+1	D+2	D+3	
				D-1	D	D+1	D+2	
					D-1	D	D+1	
						D-1	D	

Legenda

- D-1 dia corrente
- D dia da previsão
- D+n dias consecutivos para acoplamento com a FCF

Fonte: ONS

- Na sexta-feira o horizonte de previsão tem 7 dias.
- Durante a semana, a cada dia, o horizonte vai se “encurtando”.
- Na quinta-feira o horizonte de previsão é de apenas 1 dia.

Modelo de previsão da média diária da carga global

Uma Máquina de Vetor de Suporte (*Support Vector Regression*) ajustada para cada um dos sete dias da semana (7 modelos).

Variável explicada: média diária da carga global

Variáveis explicativas:

- Valores passados da média diária da carga global
- Feriados e dias especiais
- Valores previstos da temperatura média/máxima diária
- Mês do dia da previsão
- Horário de verão ou normal

Os 7 modelos ajustados fornecem previsões da média diária da carga global até 7 dias à frente, cada modelo fornece uma previsão

Modelos de previsão do perfil diário em p.u.

Dias classificados em 6 tipos: dia normal, véspera de feriados, feriados (Nacionais, Estaduais, Natal e Ano Novo), dia após feriado, dias de Carnaval e quarta-feira de cinzas.

Um conjunto de 24 Máquinas de Vetor de Suporte (uma para cada hora do dia) é ajustada aos perfis classificados em cada um dos 6 tipos (6 x 24 modelos).

Variável explicada: demanda média horária em p.u. da média diária

Variáveis explicativas:

- Mês
- Horário de verão ou normal
- Dia da semana
- Valores passados da demanda média horária em p.u. da média diária
- Previsão da temperatura para a hora da previsão

A passagem das previsões horária para semi-horárias é efetuada por meio de interpolações.

3 Patamares de carga

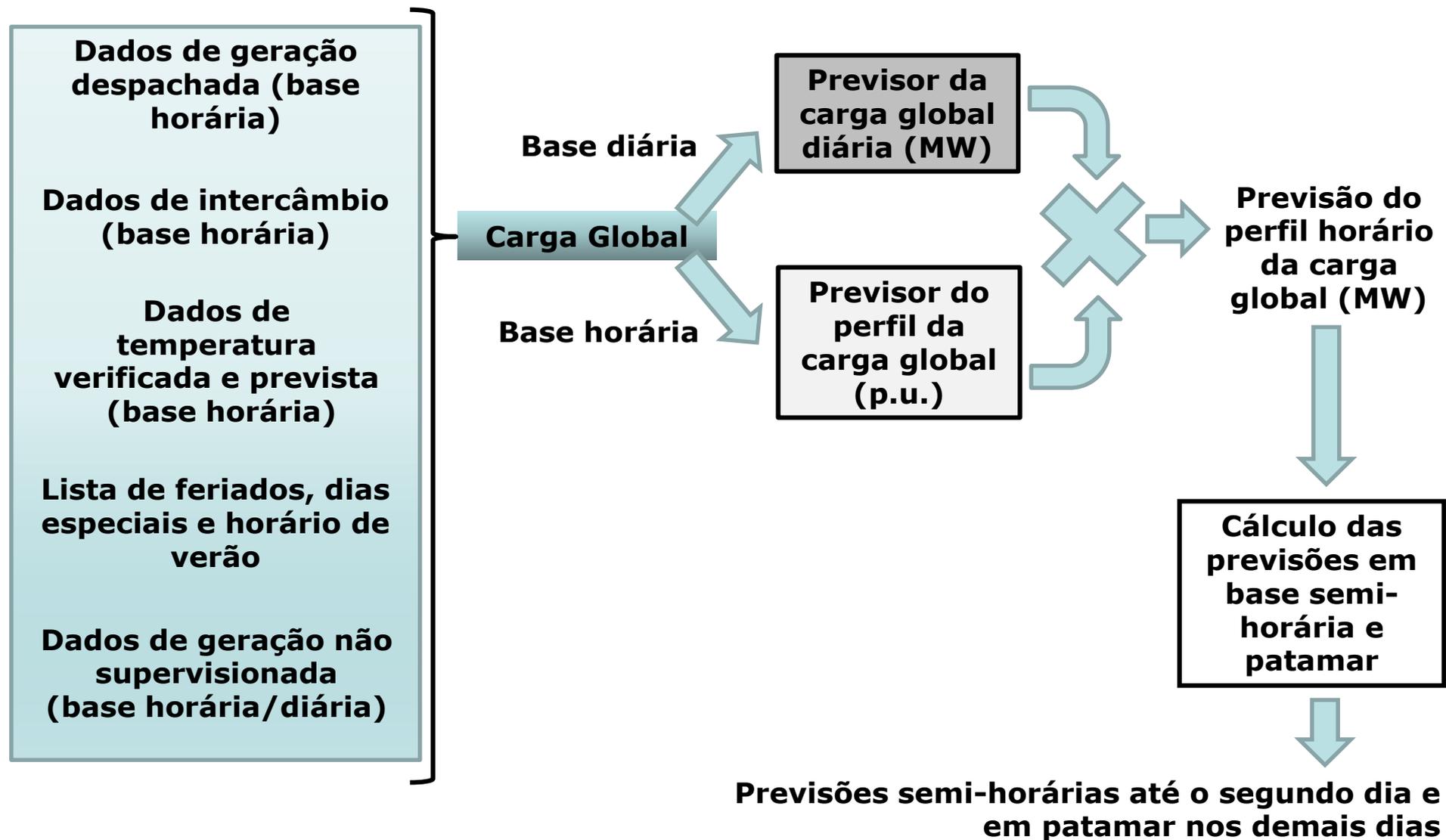
Quadro 1 – Intervalos horários dos patamares de carga de energia⁵

Patamar de carga	Sem horário de verão		Com horário de verão	
	2ª feira a Sábado	Dom/Fer	2ª feira a Sábado	Dom/Fer
Pesada	18 h às 21 h	-	19 h às 22 h	-
Média	07 h às 18 h 21 h às 24 h	17h às 22 h	07 h às 19 h 22 h às 24 h	18 h às 23 h
Leve	00 h às 07 h	00h às 17 h 22 h às 24 h	00 h às 07 h	00 h às 18 h 23 h às 24 h

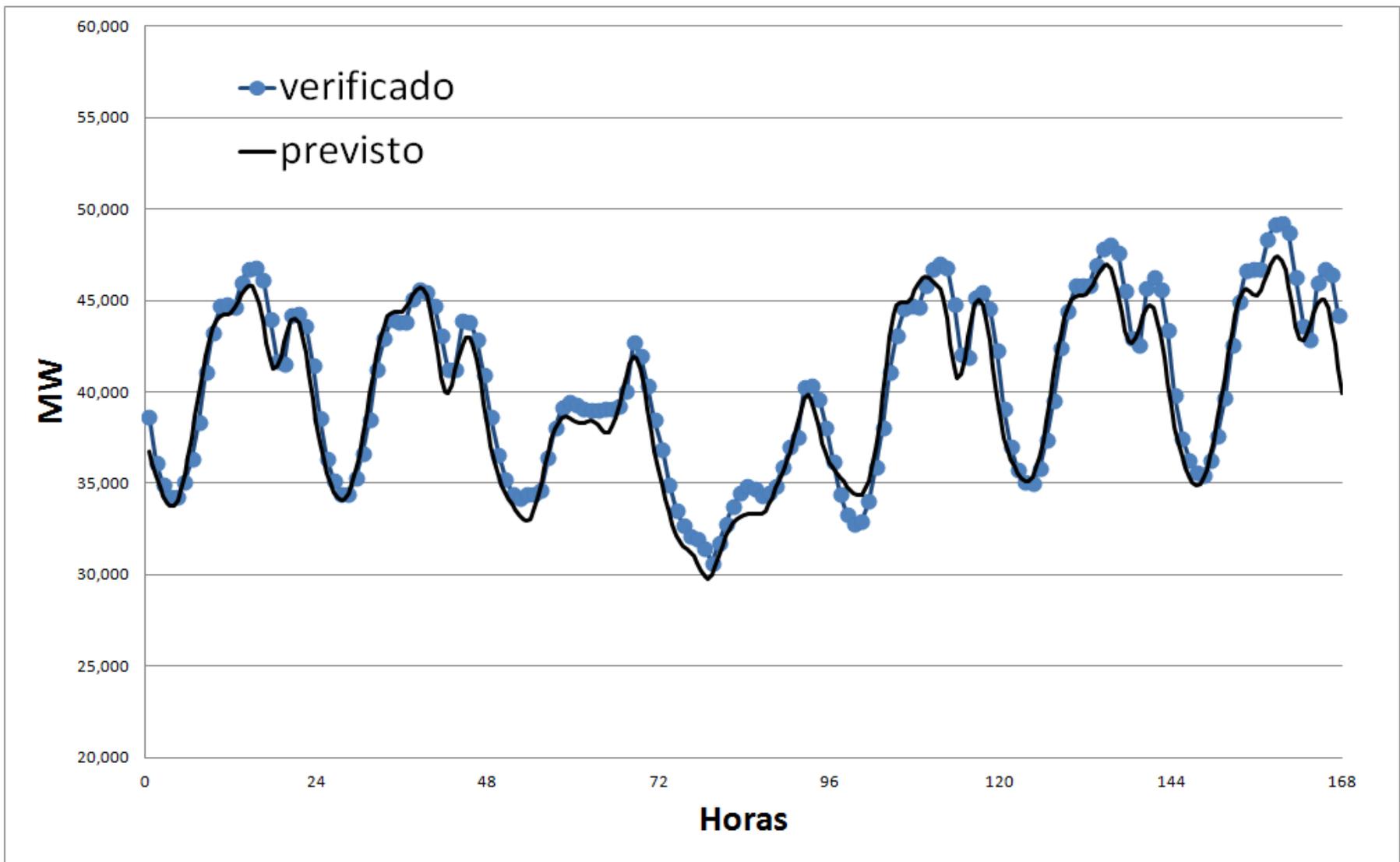
Submódulo 5.6

Consolidação da previsão de carga para a elaboração do Programa Mensal da Operação Energética

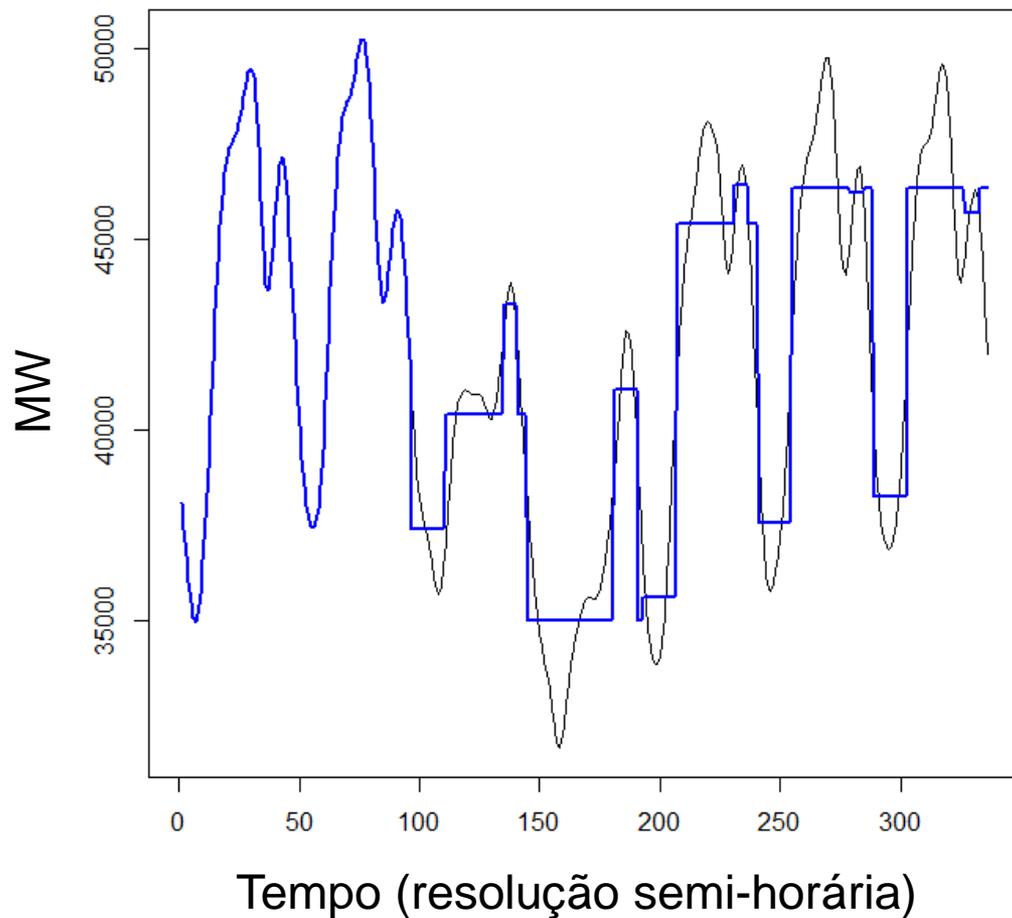
PREVCARGADESSEM: ARQUITETURA DO MODELO



PREVCARGADESSEM: PREVISÕES HORÁRIAS



PREVCARGADESSEM: PREVISÕES SEMI-HORÁRIAS E POR PATAMAR



**Previsão semi-horária
até 48 horas à frente**

**Previsão por patamar
para as demais horas do
horizonte de previsão**

PREVCARGAPMO - Previsão de carga para o plano mensal da operação

O modelo processa seqüencialmente 4 modelos de previsão:

- Modelo de previsão da carga média diária (para completar a semana operativa corrente)
- Modelo de previsão da carga média da primeira semana
- Modelo de previsão da carga média de 2 até 6 semanas à frente
- Modelo de previsão da carga média mensal até 2 meses à frente

Todos os modelos de previsão empregam *support vector regression*

A previsão da carga mensal para o primeiro mês é a média das cargas semanais previstas, mas descontando o efeito dos dias não pertencentes ao primeiro mês

Previsões atualizadas uma vez por semana

PREVCARGAPMO: Previsão de carga para o dia seguinte

Variável resposta:

- Taxa de crescimento da média diária da carga

Variáveis explicativas:

- Temperatura máxima do dia da previsão
- Temperatura mínima do dia da previsão
- Temperatura média do dia da previsão
- Dummy de feriados e dias especiais (9 categorias)
- Dummy indicadora do horário de verão (1 dummy)
- Dummy do mês
- Dummy do dia da semana
- Valores passados da taxa de crescimento da carga diária *lags* t-1, t-2, t-7, t-14, t-21 e t-28

Previsão para completar a semana operativa corrente

Previsão do perfil da curva de carga em p.u.: previsão por semelhança com o auxílio do classificador **Naive Bayes** no qual consideram-se as seguintes variáveis categóricas: **dia da semana**, **mês**, **feriado/dia especial**, **horário de verão** e **tipologias** identificadas a partir dos dados por meio da **análise de agrupamento** (método de Ward).

Variável resposta:

- Taxa de crescimento da carga semanal

Variáveis explicativas:

- Temperatura prevista máxima/média da semana
- Tipo de feriado/dia especial em cada dia da semana de previsão
- Proporção de dias em horário de verão na semana de previsão
- Dummy do mês: mês modal na semana de previsão
- Valores passados da taxa de crescimento da carga semanal
lags t-1, t-2, t-3, t-4, t-5 e t-6

Variável resposta:

- Taxa de crescimento da carga semanal h passos à frente, $h=2,3,4,5,6$ semanas
- Um modelo para cada valor de h

Variáveis explicativas:

- Tipo de feriado/dia especial em cada dia da semana de previsão
- Proporção de dias em horário de verão na semana de previsão
- Dummy do mês: mês modal na semana de previsão
- Valores passados da taxa de crescimento da carga semanal *lags* $t-1$, $t-2$, $t-3$, $t-4$, $t-5$ e $t-6$

Variável resposta:

- Carga mensal

Variáveis explicativas:

- Proporção de feriados e dias especiais no mês
- Proporção de dias em horário de verão no mês
- Valores passados da carga mensal nos *lags* $t-1$, $t-2$, $t-3$, $t-4$, $t-5$, $t-6$ e $t-12$

PREVISÕES PrevCargaPMO	Atividade	PMO Set 2017	REV1	REV2	REV3	REV4	PMO Out 2017
	Data da previsão	23/08/2017	31/08/2017	06/09/2017	14/09/2017	21/09/2017	27/08/2017
	Semanas	1	2	3	4	5	6
	inicio	26/08/2017	02/09/2017	09/09/2017	16/09/2017	23/09/2017	30/09/2017
	fim	01/09/2017	08/09/2017	15/09/2017	22/09/2017	29/09/2017	06/10/2017
REVO PMO Set 2017	N	5.780	5.561	5.646	5.668	5.686	5.549
	NE	9.882	9.618	9.855	9.873	9.977	9.995
	S	10.378	9.570	10.301	10.245	10.186	10.374
	SE	33.588	33.621	34.829	35.110	35.366	35.860
REV1	N		5.591	5.644	5.652	5.699	5.557
	NE		9.607	9.865	9.874	9.975	10.004
	S		10.056	10.481	10.294	10.248	10.512
	SE		31.779	34.916	35.058	35.306	35.898
REV2	N			5.512	5.462	5.504	5.461
	NE			9.603	9.675	9.828	9.720
	S			10.582	10.165	10.237	10.527
	SE			33.579	35.026	34.805	35.802
REV3	N				5.695	5.669	5.562
	NE				9.676	9.855	9.880
	S				10.745	10.494	10.619
	SE				34.453	35.291	36.202
REV4	N					5.730	5.621
	NE					9.745	9.835
	S					10.635	10.630
	SE					35.593	36.044

Previsões atualizadas semanalmente

- **Diferentes métodos de previsão**
- **Não há um método de previsão de carga superior**
- **Necessidade de tratar os dados de carga e de temperatura para remoção de *outliers* e preenchimento de lacunas**
- **PCCP**
Previsão de curtíssimo prazo até 48 horas à frente
Lógica fuzzy
Previsões atualizadas a cada hora
- **PrevcargaDESSEM**
Previsão de curto prazo até 168 horas à frente
Support Vector Regression
Previsões atualizadas diariamente
- **PrevcargaPMO**
Previsão de curto/médio prazo até 6 semanas à frente
Support Vector Regression
Previsões atualizadas semanalmente

Obrigado
prevmercado@cepel.br

1. ALMEIDA, V.A.; PESSANHA, J.F.M.; CALÔBA, L.P. . Uma Metodologia para o Tratamento de Dados de Carga Baseada em Técnicas de Inteligência Artificial. Workpedia 2016 Inteligência artificial, Inteligência coletiva e Ciência de dados, 2016, Niteroi.
2. CEPERIC, E.; CEPERIC, V.; BARIC, A.A. Strategy for short-term load forecasting by support vector regression machines, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 28, NO. 4, NOVEMBER 2013.
3. DUBINSKY A.; ELPERIN, T. A method for calculating a load curve using average values of load over time intervals, Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No. 6, pp. 393-395, 1997.
4. HONG, T.; FAN, S. Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review, International Journal of Forecasting, Volume 32, Issue 3, July–September 2016, Pages 914-938
5. PESSANHA, J.F.M.; JUSTINO, T.C.; MACEIRA, M.E.P. Metodologia para filtragem de registros de carga. XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2012, Rio de Janeiro.
6. PESSANHA, J.F.M.; JUSTINO, T.C. Uma Metodologia para Previsão de Carga no Curto-Prazo. XIII SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA, 2014, Foz do Iguaçu.
7. WANG, L.X.; MENDEL, M. Generating fuzzy rules by learning from examples, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, v. 22, n. 6, November/December, 1992.