

4

Aplicação das Metodologias Analisadas

Este capítulo apresenta os resultados dos métodos descritos no capítulo anterior aplicados nas séries dos patamares de carga.

Inicialmente, é apresentada a descrição dos dados de entrada para utilização por esses métodos e, em seguida, a análise iniciada no capítulo 2 para os patamares de carga é complementada com variáveis exógenas para destacar as características relevantes para os modelos de previsão.

4.1

Dados de Entrada

Na seção 0, as séries analisadas neste trabalho foram apresentadas quanto à origem, forma, alguns atributos e informações utilizadas como variáveis explicativas. Nesta seção, é apresentada a disposição das informações a serem utilizadas em cada um dos métodos, e sua identificação. A tabela 3 apresenta esta disposição.

Tabela 3 – Patamares de Carga e Variáveis Associadas

Data	CT	CL	CM	CP	Dsem	HV	Fer	Tmin	Tmax	Tmed
20031010	27931	22995	29430	32452	6	0	0	21	24	23
20031011	25400	22753	25732	30026	7	0	0	17	21	19
20031012	21748	20597	26120		1	0	1	17	20	18
20031013	25943	19902	27758	31565	2	0	0	17	23	19
20031014	26835	21697	28323	31878	3	0	0	17	20	18
20031015	26939	21818	28409	32027	4	0	0	16	22	19
20031016	26926	21880	28371	31956	5	0	0	16	23	19
20031017	27276	22013	28861	32163	6	0	0	15	25	19
20031018	25387	22068	25763	31377	7	0	0	15	28	21
20031019	22971	21690	27582		1	1	0	19	33	25
20031020	27440	22188	29204	31464	2	1	0	22	26	24
20031021	28357	23644	30005	31662	3	1	0	22	28	24

As variáveis indicadas na tabela 3 possuem a seguinte descrição:

- Data: é a identificação do dia com a formatação “yyyyMMdd” (ano, mês e dia);
- CT: carga média diária em Mw médios;
- CL: patamar de carga leve em Mw médios;
- CM: patamar de carga medio em Mw médios;

- CP: patamar de carga pesado em Mw médios;
- Dsem: identificador do dia da semana (domingo=1, segunda-feira=2, terça-feira=3, quarta-feira=4, quinta-feira=5, sexta-feira=6 e sábado=7);
- HV: identificador se o dia está dentro ou fora do horário de verão (dentro=1 e fora=0);
- Fer: identificador se o dia é ou não um feriado (sim=1 e não=0);
- Tmin: temperatura mínima do dia;
- Tmax: temperatura máxima do dia;
- Tmed: temperatura média do dia.

Além de uma análise gráfica, também apresentada na seção 0, os dados foram analisados com o objetivo de identificar relações relevantes ao problema. A tabela 4 apresenta a correlação entre os três patamares de carga, a carga global diária e as temperaturas máxima, mínima e média.

Tabela 4 – Principais Correlações Identificadas

	CT	CL	CM	CP	Tmin	Tmax	Tmed
CT	1,0000						
CL	0,7890	1,0000					
CM	0,8740	0,7851	1,0000				
CP	0,8445	0,6248	0,8156	1,0000			
Tmin	0,1818	0,3999	0,1849	-0,1133	1,0000		
Tmax	0,2246	0,4019	0,2460	0,0785	0,6430	1,0000	
Tmed	0,2250	0,4449	0,2363	-0,0288	0,8679	0,9141	1,0000

Observa-se nos resultados, a forte correlação entre os três patamares de carga, 62,5% entre os patamares de carga leve e o de pesada, 78,5% entre os patamares de carga leve e média e 81,6% entre os patamares de carga pesada e média. A correlação dos patamares de carga com a carga global diária é ainda maior, sendo: 78,9%, 87,4% e 84,4% entre a carga global diária e os patamares de carga leve, média e pesada, respectivamente.

A tabela 4 mostra que as relações lineares entre os patamares de carga e as temperaturas ficam em torno de 40,0% somente nas correlações com o patamar de carga leve, e para o patamar de média as correlações ficam praticamente na metade com o

patamar de leve, e em relação ao patamar de pesada a correlação é bem menor que 1,0%.

Sabe-se que o comportamento da sociedade implica no comportamento das curvas de carga, que implica no comportamento dos patamares de carga, uma vez que os patamares de carga são agregações dos intervalos da curva de carga, conforme já explicado. Dessa forma, como as temperaturas mais elevadas influem no comportamento da sociedade, onde as pessoas ligam ar condicionado, abrem e fecham suas geladeiras, etc., em fim, consomem energia, principalmente na região Sudeste/C. Oeste do Brasil, o que se espera é que a variação do consumo de energia em função das temperaturas, mais ou menos elevadas, influenciem de forma linear ou não nos patamares de carga.

No caso da correlação, os resultados apresentados mostram o quanto às relações lineares pode ser explorado pelos modelos, e indica a pesquisa de modelos de previsão que considerem as relações lineares entre os patamares. Já a correlação dos patamares de carga com as temperaturas, apesar de mais baixos, também devem ser analisadas, principalmente na adoção das temperaturas como variáveis explicativas. Lembrando, que o sentimento que se pode ter sobre as temperaturas é de que elas influenciam na carga, logo se as relações lineares são baixas, possivelmente as relações não lineares deverão ter alguma influência relevante no comportamento dos patamares de carga.

4.2

Resultados das Metodologias Analisadas

Os modelos foram aplicados às séries dos patamares de carga diárias do subsistema Sudeste/C. Oeste Brasileiro com considerações diferentes entre os dados utilizados na modelagem e avaliação entre os modelos estatísticos e de rede neural.

A quantidade de informações utilizadas na modelagem para validação do modelo e testes implica na definição dos parâmetros pelo modelo, e também em alteração dos resultados estatísticos dos mesmos.

O desempenho dos modelos estatísticos para cada um dos patamares de carga, num primeiro momento, foi avaliado considerando praticamente toda a série, pois o objetivo foi avaliar o melhor dos modelos, para compará-lo ao modelo proposto. O melhor modelo, quando comparado ao modelo proposto terá seus parâmetros e desempenho reavaliado de acordo com a amostra utilizada para modelagem e testes.

Entretanto, a relação entre os modelos estatísticos avaliados, ou seja, qual o melhor modelo, mesmo com a alteração da amostra para modelagem e testes, não muda.

No desenvolvimento de uma rede neural, recomenda-se utilizar 3 conjuntos de informações, uma para treinamento do modelo (modelagem), uma para validação e outra para testes. Para tentar manter a compatibilidade com o que foi feito com os modelos estatísticos quanto a utilização do universo de informações na modelagem, utilizou-se 3/5 desse universo para treinamento e 1/5 para validação e testes (dados entre 01/01/2003 e 24/01/2008 – 1850 informações).

4.2.1

Modelos Estatísticos

Os modelos de amortecimento exponencial, de Box & Jenkins e o modelo de regressão dinâmica foram avaliados através do *software “Forecast Pro for Windows”* [8], tanto na identificação do modelo quanto na estimação dos parâmetros. Estes modelos foram aplicados a cada uma das 3 séries de patamar de carga diário. Além disso, as séries foram analisadas de forma automática por esta ferramenta quanto a alguns movimentos característicos. Segue algumas características e considerações quanto às séries trabalhadas:

1) Série do Patamar de Carga Leve:

- A decomposição mostrou que a série possui componentes tendencial, cíclica, sazonal e aleatória, sendo que a tendencial/cíclica corresponde a 82,25%, a sazonal a 11,95% e a aleatória a 5,80%;
- A componente sazonal possui uma estrutura multiplicativa;
- O modelo de amortecimento exponencial adotado foi sem tendência e sazonal multiplicativo, considerando a variável de intervenção para feriados - FER.
- Foi necessária a aplicação de uma transformação logarítmica para estabelecer a estacionaridade para o modelo de Box & Jenkins;
- Para o modelo de regressão dinâmica também foi adotada a transformação logarítmica, e o modelo contou com 14 regressores e 6 *lags* de erro;
- Os modelos e suas estruturas podem ser verificados no ANEXO I.

2) Série do Patamar de Carga Média:

- A decomposição mostrou que a série possui componentes tendencial, cíclica, sazonal e aleatória, sendo que a tendencial/cíclica corresponde a 67,48%, a sazonal a 26,22% e a aleatória a 6,30%;
- A componente sazonal possui uma estrutura multiplicativa;
- Foi necessária a aplicação de uma transformação logarítmica para estabelecer a estacionaridade para o modelo de Box & Jenkins;
- O modelo de amortecimento exponencial adotado foi sem tendência e sazonal multiplicativo, considerando a variável de intervenção para feriados – FER;
- Para o modelo de regressão dinâmica também foi adotada a transformação logarítmica, e o modelo contou com 8 regressores e 2 *lags* de erro;
- Os modelos e suas estruturas podem ser verificados no ANEXO II.

3) Série do Patamar de Carga Pesada:

- A decomposição mostrou que a série possui componentes tendencial, cíclica, sazonal e aleatória, sendo que a tendencial/cíclica corresponde a 23,65%, a sazonal a 0,49% e a aleatória a 75,86%;
- A série pode ser considerada não sazonal. A pequena parte da componente sazonal é aditiva;
- A série foi avaliada como estacionária;
- Como não há ocorrência do patamar de carga pesada aos domingos, a semana foi considerada como se tivesse 6 dias para esta série (ciclos de 6 dias). Esta consideração melhorou sobremaneira o desempenho dos modelos estatísticos para este patamar de carga.
- Foi considerada a variável de intervenção “FER” para identificar a ocorrência de feriados.
- Para o modelo de regressão dinâmica também foi adotada a transformação logarítmica, e o modelo contou com 8 regressores e 5 *lags* de erro;
- Os modelos e suas estruturas podem ser verificados no ANEXO III.

Para avaliar o melhor modelo estatístico utilizaram-se as estatísticas MAPE e RMSE. A

tabela 5 apresenta os desempenhos de modelagem dos modelos estatísticos aplicados às series, e se observa que o modelo de regressão dinâmica apresenta o melhor resultado entre eles para todos os patamares de carga. Este resultado já era de se

esperar, em função deste modelo contar em sua estrutura com outras variáveis explicativas, tais como temperatura, um dos outros patamares, ou a carga média diária, etc., o que melhora seu desempenho.

Tabela 5 – Avaliação dos Modelos Estatísticos

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - MAPE (%)			
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA	PESADA
Amortecimento Exponencial	1,82	1,85	1,27
Box & Jenkins	1,74	1,73	4,19
Regressão Dinâmica	0,89	0,61	0,79

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - RMSE			
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA	PESADA
Amortecimento Exponencial	648,0	828,2	649,2
Box & Jenkins	594,4	774,7	6079,0
Regressão Dinâmica	298,0	331,6	514,1

4.2.2

Modelo de Rede Neural

Uma vez apresentado o desempenho dos modelos estatísticos, que expressa às relações lineares entre as variáveis consideradas, buscou-se uma forma para considerar também relações não-lineares entre as variáveis. Para tal, os modelos de inteligência computacional são os mais indicados, e assim sendo, foi analisada a aplicação do modelo de rede neural nas séries de patamares de carga. Foi avaliado um modelo de rede neural com uma implementação *feed-forward backpropagation* utilizando-se o MATLAB [13].

Inicialmente, avaliou-se a aplicação do modelo a cada uma das séries, utilizando as características que os modelos estatísticos mostraram para um melhor desempenho, principalmente no que diz respeito à estrutura dos modelos de regressão dinâmica, tais como: quais as variáveis explicativas haviam sido utilizadas, se o próprio patamar de carga em passos anteriores poderia ser utilizado, as temperaturas, etc.

Várias tentativas para melhor ajuste do modelo foram feitas, principalmente, quanto à utilização das variáveis na estrutura para cada série de patamar de carga, mas o melhor desempenho da rede neural foi obtido quando se avaliou a projeção dos três patamares de carga no mesmo modelo, ou seja, definiram-se através de várias

simulações as variáveis de entrada na estrutura do modelo utilizando-se na saída os três patamares de carga.

Além de se modelar os 3 patamares na saída do modelo, uma outra constatação foi de que se obtém um melhor desempenho num modelo para os dias da semana sem o domingo, ou seja, o domingo modelado à parte. No caso do modelo para o domingo, haverá na saída somente 2 patamares de carga o de leve e o de média.

A tabela 6 apresenta os resultados do modelo de rede neural sem o domingo, onde sua estrutura do modelo contou com 9 entradas (os patamares de carga em t-1, a carga global em t e t-1, a indicação do feriado em t, e as temperaturas máxima, média e mínima em t), 36 neurônios na camada escondida e 3 saídas (os patamares de carga leve, média e pesada).

Tabela 6 – Avaliação do Modelo de Rede Neural (1 – sem domingos)

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - MAPE (%)			
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA	PESADA
Rede Neural (Treinamento)	1,04	0,51	1,06
Rede Neural (Validação)	1,10	0,72	1,30
Rede Neural (Teste)	2,49	1,57	2,38

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - RMSE			
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA	PESADA
Rede Neural (Treinamento)	315,3	198,3	429,3
Rede Neural (Validação)	368,2	287,9	610,1
Rede Neural (Teste)	850,9	708,3	1127,3

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - U de Theil			
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA	PESADA
Rede Neural (Treinamento)	0,265	0,090	0,054
Rede Neural (Validação)	0,309	0,126	0,067
Rede Neural (Teste)	0,702	0,314	0,120

A tabela 7 apresenta os resultados do modelo de rede neural para o domingo, onde sua estrutura do modelo contou com 8 entradas (os patamares de carga em t-1, a carga global em t e t-1, a indicação do feriado em t, e as temperaturas máxima, média e mínima em t), 32 neurônios na camada escondida e 2 saídas (os patamares de carga leve e média).

Tabela 7 – Avaliação do Modelo de Rede Neural (2 – domingos)

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - MAPE (%)		
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA
Rede Neural (Treinamento)	0,28	0,65
Rede Neural (Validação)	0,73	1,31
Rede Neural (Teste)	1,43	1,82

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - RMSE		
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA
Rede Neural (Treinamento)	73,8	218,5
Rede Neural (Validação)	291,1	514,3
Rede Neural (Teste)	485,4	719,9

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - U de Theil		
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA
Rede Neural (Treinamento)	0,080	0,263
Rede Neural (Validação)	0,352	0,627
Rede Neural (Teste)	0,552	0,853

A tabela 8 apresenta a composição dos resultados dos treinamentos dos dois modelos de rede neural, e sua comparação ao melhor dos modelos estatísticos, o de regressão dinâmica.

Tabela 8 – Comparação dos Modelos – Regressão Dinâmica X Rede Neural

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - MAPE (%)			
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA	PESADA
Regressão Dinâmica	0,89	0,61	0,79
Rede Neural (Treinamento)	0,95	0,53	0,93

ESTATÍSTICAS DOS MODELOS - RMSE			
Modelos \ PATAMARES	LEVE	MEDIA	PESADA
Regressão Dinâmica	298,0	331,6	514,1
Rede Neural (Treinamento)	286,3	200,7	377,9

4.2.3

Conclusão dos Resultados Obtidos

Com base nos resultados obtidos pela aplicação dos modelos avaliados, observou-se um bom desempenho do modelo estatístico de regressão dinâmica e o de rede neural. O modelo de regressão dinâmica foi superior na avaliação do MAPE no patamar de leve e de pesada, entretanto no patamar de pesada o RMSE é mais alto, o

que indica a ocorrência de erros mais elevados nas previsões deste modelo em relação ao de rede neural, de forma pontual, o que é penalizado por esta estatística. Já no patamar de média, o modelo de rede neural ganhou tanto no MAPE quanto no RMSE. Como o MAPE do modelo de regressão dinâmica foi melhor em 2 entre 3 patamares este foi escolhido para avaliar o desempenho do modelo proposto.

O desempenho do modelo de rede neural, principalmente a avaliação de que este último apresenta um resultado satisfatório quando se considera uma estrutura com os três (ou dois) patamares de carga na saída, ao invés de se ter um modelo para cada patamar de carga, levou a análise de um modelo que também pudesse considerar as relações entre os patamares de carga.