

5 Avaliação Experimental

Para a avaliação da metodologia proposta, foram feitos testes para analisar o resultado da rede neural, considerando ou não o que foi proposto em cada uma das etapas de pré-processamento, seleção de variáveis e inferência. Além disto, foi elaborada uma simulação de mudança de processo, através da alteração de parte dos dados originais, que, por sua vez, é um dos aspectos de maior importância nesta dissertação. Todas estas situações estão detalhadas a seguir.

A métrica aplicada no sistema para determinar o erro entre a saída desejada d_i e a saída obtida y_i foi o erro médio absoluto percentual conhecido como MAPE (*Mean Absolute Percent Error*). Sua fórmula está apresentada na Equação 11.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N (d_i - y_i), d_i \times 100 \%}{N} \quad (11)$$

No sistema proposto, na etapa de pré-processamento, os dados originais sofreram uma limpeza para eliminar sinais espúrios e instrumentos que apresentavam leituras adversas ao processo. Em seguida, foram feitas a segmentação dos dados de saída e a criação de janelas de entrada, para compatibilizar o período de armazenamento de um e de outro. Já na validação, algumas janelas de entrada, que estavam apresentando valores fora da faixa padrão determinada pela distribuição normal de cada instrumento, foram eliminadas. Com isto, dois grupos de teste foram criados para analisar o desempenho do sistema. O primeiro utilizou para o treinamento da rede neural todas as janelas de entrada existentes antes da etapa de validação, totalizando 771 janelas, Ao passo que o segundo utilizou somente as janelas escolhidas no processo de validação, ou seja, 664 janelas, pois 107 janelas de entrada foram eliminadas.

Vale salientar que os dois grupos de dados criados, o completo e o reduzido, foram divididos seguindo as especificações percentuais da validação cruzada e do grupo teste, conforme descrito no item 4.3 de padrões de treinamento.

Aplicando os dois bancos de dados nas diversas estruturas de redes neurais elaboradas, foi verificado que os resultados se mostraram muito semelhantes, tanto para o grupo com dados completos, quanto para o grupo com dados reduzidos. Segundo os cálculos realizados no sistema, a diferença em erro percentual do MAPE para o treinamento de ambos os grupos foi inferior a 0,01%. Desta forma, conclui-se que a redução de janelas, além de não afetar o aprendizado da rede neural, permitiu um treinamento mais otimizado, pois o número de dados apresentados à rede foi menor, permitindo, assim, que a mesma executasse o aprendizado mais rapidamente.

Para verificar o desempenho da etapa de seleção de variáveis, foi feita uma segunda avaliação, pois existia um interesse em comprovar se as técnicas e critérios de seleção estavam realmente selecionando variáveis relevantes ao processo, sem a perda de informações significativas. Conforme descrito na seção 4.2, foram aplicadas as técnicas de LSE e correlação cruzada. Os resultados dos dois métodos foram combinados e, por uma heurística, identificou-se que 5 das 36 variáveis de entrada já eram suficientes para que o sistema inferisse a saída desejada.

Diversas redes neurais foram treinadas, validadas e testadas eliminando passo a passo um determinado número de instrumentos. Os erros MAPE, calculados ao final de cada teste, se mostraram muito semelhantes, com exceção dos casos em que se retirava um dos 5 instrumentos selecionados. Quando este fato ocorria, o erro aumentava consideravelmente, comprovando que o sistema estava perdendo informações importantes do processo no treinamento da rede neural. Desta forma, foi comprovado que realmente o processo de seleção foi eficaz, não comprometendo o aprendizado da rede neural e melhorando seu desempenho.

A escolha da topologia mais adequada para a rede neural, que foi utilizada com o filtro de Kalman estendido, foi realizada experimentalmente pela execução de diversos treinamentos. Foram utilizadas configurações com 1, 3, 5 ou 7 neurônios na camada escondida, variando para cada uma delas o conjunto de dados, formado com médias de 60, 120, 180, 240 ou 300, conforme descrito no item 4.3. Em resumo, foram treinadas 4 tipos de redes neurais com 5 grupos de dados de entrada e saída, o que reúne 20 tipos de treinamento diferentes, sendo

que cada um foi repetido 10 vezes para considerar a aleatoriedade da inicialização automática dos pesos.

Além disto, também são calculados os erros MAPE de testes feitos com entradas modificadas que simulam uma mudança no processo. Esta simulação tem como objetivo variar a saída de dados dinamicamente, de forma a verificar o comportamento do sistema quando houver uma alteração no processo. Para tanto, o grupo de testes gerado anteriormente teve parte dos seus dados de saída somados a um gráfico tipo rampa (Figura 21). O comportamento da rede neural com e sem o filtro de Kalman estendido foi, então, avaliado pela observação das adaptações do sistema frente às variações do processo.

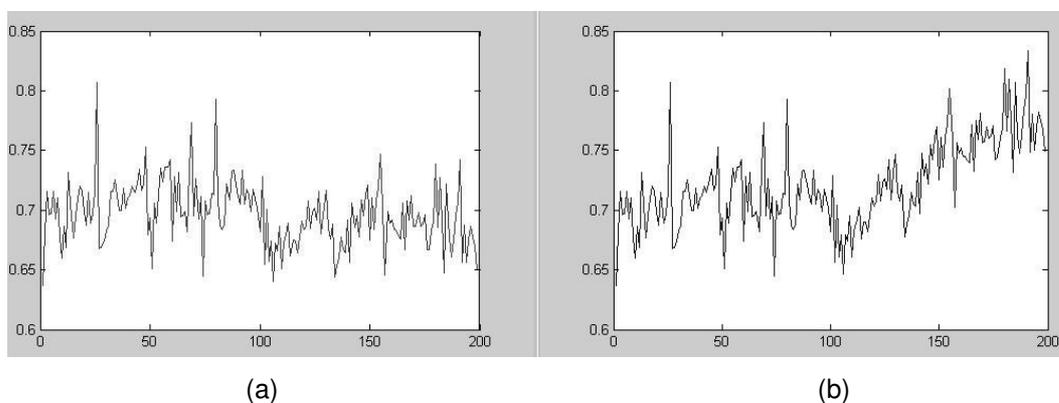


Figura 21: Saída de dados original (a) e somada com uma rampa (b).

Os resultados destes experimentos estão apresentados na Tabela 3, dispostos em 8 colunas. As duas primeiras colunas apresentam as condições de teste e as demais, os erros MAPE para os grupos de treinamento (60% dos dados), validação (30% dos dados) e teste (10% dos dados) considerando ou não a utilização do filtro de Kalman estendido.

Adiante, cada item da Tabela 3 está comentado para que a mesma possa ser interpretada adequadamente.

- Média: Identifica se a média utilizada na formação do grupo de dados foi de 60, 120, 180, 240 ou 300.
- Neurônios da Camada Escondida: Identifica o número de neurônios da camada escondida da rede neural, variando entre 1, 3, 5 ou 7.
- Erro Treino: Resultado do MAPE calculado com o grupo de treinamento após o treinamento da rede neural.
- Erro Validação: Resultado do MAPE calculado com o grupo de validação após o treinamento da rede neural.

- Erro Teste: Resultado do MAPE calculado com o grupo de teste após o treinamento da rede neural com ou sem o filtro de Kalman estendido.
- Erro Teste c/ Rampa: Resultado do MAPE calculado com o grupo de teste, modificado pela rampa que simula a mudança de processo, após o treinamento da rede neural com ou sem o filtro de Kalman estendido.

Média	Neurônios da Camada Escondida	Rede Neural				Rede Neural c/ FKE	
		Erro Treino	Erro Validação	Erro Teste	Erro Teste c/ Rampa	Erro Teste	Erro Teste c/ Rampa
60	1	1,0975	1,1608	1,0407	1,6782	1,1036	1,555
60	3	0,7727	0,8832	0,8064	1,6623	0,8348	0,9353
60	5	0,7204	0,8832	0,8389	1,6818	0,833	1,583
60	7	0,8006	0,8935	0,8414	1,6654	1,2955	1,3446
120	1	0,8252	0,912	0,8065	1,667	0,8333	1,7512
120	3	0,7952	0,8747	0,8058	1,6684	0,8558	1,1611
120	5	0,7204	0,8892	0,8409	1,6188	0,998	1,166
120	7	0,7214	0,852	0,8152	1,6645	0,8174	1,0481
180	1	0,8148	0,9152	0,7964	1,6678	0,8241	1,7636
180	3	0,7615	0,9124	0,7838	1,6505	0,7856	1,2204
180	5	0,7775	0,9167	0,7963	1,6577	0,8036	1,4819
180	7	0,6968	0,8998	0,7932	1,6585	0,8287	1,0564
240	1	0,8015	0,9112	0,7774	1,6454	0,7925	1,6377
240	3	0,8058	0,9077	0,7888	1,6679	0,7928	1,5438
240	5	0,7148	0,8716	0,7692	1,6297	0,7834	1,3002
240	7	0,713	0,8799	0,8633	1,7947	0,8552	1,0494
300	1	0,7982	0,9012	0,7786	1,6589	0,8007	1,628
300	3	0,738	0,8928	0,776	1,6304	0,783	1,5002
300	5	0,7164	0,9005	0,8723	1,7493	0,9248	1,3656
300	7	0,7817	0,8855	0,8147	1,7333	0,8421	1,4637

Tabela 3: Resultados dos testes realizados.

Observando os resultados dos testes realizados, algumas conclusões podem ser tiradas, elucidando as vantagens da metodologia proposta. Por exemplo, comparando os valores do erro de teste obtidos com um mesmo grupo de dados aplicado à rede neural com e sem o filtro de Kalman estendido (Erro Teste), pode-se notar que o erro de uma técnica é quase idêntico ao da outra. Isto demonstra que a metodologia utilizando o filtro de Kalman estendido não está danificando o resultado da inferência, além do que mantém a mesma eficiência da rede neural.

Por outro lado, os valores do erro de teste obtidos com um mesmo grupo de dados aplicado à rede neural com e sem o filtro de Kalman estendido, mas considerando as modificações causadas pela rampa (Erro Teste c/ Rampa), apresentaram diferença significativa. O erro da rede sem o filtro de Kalman

estendido foi superior ao encontrado com a aplicação dele. Ou seja, através do FKE o sistema consegue adaptar os valores dos pesos e dos bias da rede neural com sucesso, reagindo melhor às mudanças do processo, sem comprometer a estrutura do sistema.

Isto se torna mais claro pela análise das Figuras 22 e 23. Na primeira, observa-se que, sem o FKE, a rede neural não se adapta à mudança de processo provocada. Ao passo que a segunda ilustra que, com o FKE, a saída acompanha a variação dos dados de entrada, apresentando erros inferiores a 1% em relação à análise laboratorial. Desta forma, comprova-se que esta técnica pode auxiliar as refinarias de petróleo nos ajustes “on-line” dos sistemas de inferência, sem a necessidade de re-treinar as redes neurais quando o petróleo bruto apresentar características químicas diferentes, que venham a mudar a sintonia das malhas de controle do processo de produção.

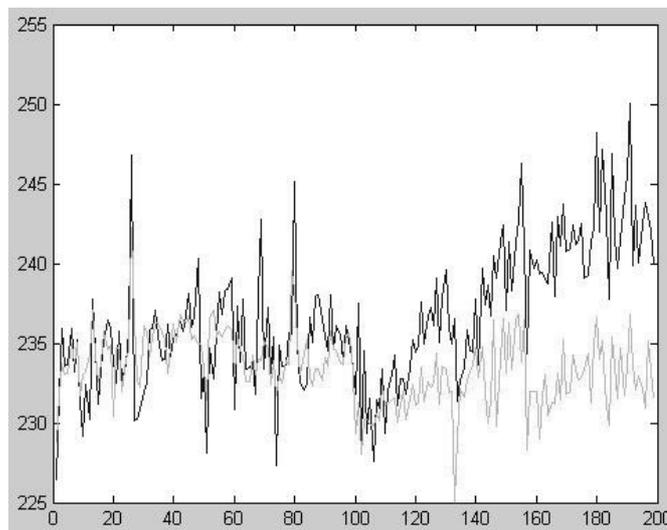


Figura 22: Inferência da saída usando RNA.

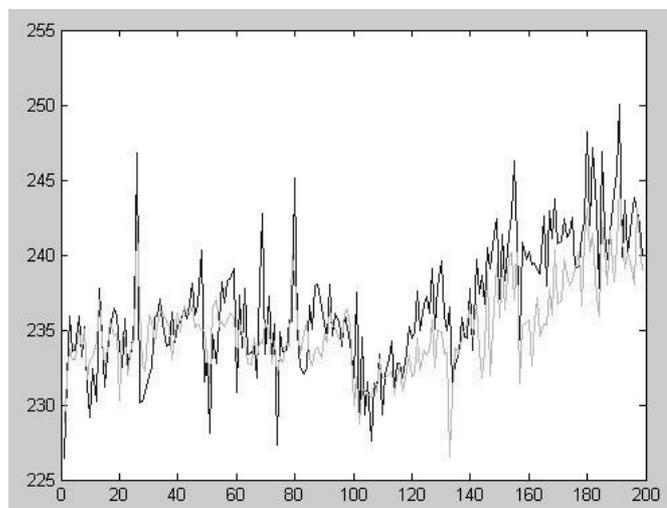


Figura 23: Inferência da saída usando RNA com FKE.

Além de todas as análises experimentais até aqui apresentadas, também foram executados alguns ajustes nos parâmetros R e Q presentes no algoritmo do filtro de Kalman estendido. Estas constantes, conforme explicado anteriormente, estão relacionadas ao amortecimento do sistema e possuem relação direta com os ruídos de medida e de processo presentes no cálculo do ganho de Kalman. Desta forma, foram realizados experimentos para avaliar tais parâmetros e melhorar o desempenho do sistema de inferência. O grupo de teste utilizado foi aquele obtido a partir da média de 60 termos, e o número de neurônios na camada escondida da rede neural variou entre 1, 3, 5 ou 7. Os erros MAPE correspondentes a estas variações estão apresentados na Tabela 4 a seguir.

Camadas	R / Q								
	0.1 / 1e-4	0.1 / 1e-5	0.1 / 1e-6	1 / 1e-4	1 / 1e-5	1 / 1e-6	10 / 1e-4	10 / 1e-5	10 / 1e-6
1	16,355	15,454	14,748	6,462	5,193	3,485	2,823	1,524	1,318
1	15,491	14,216	13,569	6,199	3,953	1,897	3,495	2,290	2,498
3	9,391	5,023	7,134	7,238	4,528	4,194	4,667	2,991	0,936
3	9,129	5,177	8,523	7,244	4,408	5,129	4,547	3,617	2,323
5	9,059	7,026	5,085	6,333	5,018	1,231	3,096	1,106	0,831
5	8,694	6,261	5,244	5,269	5,200	2,797	3,099	2,257	1,742
7	9,695	10,569	9,217	4,914	5,561	5,838	3,671	2,197	1,168
7	8,553	9,759	8,488	4,939	6,115	6,388	3,239	2,783	2,280

Tabela 4: Influência dos parâmetros R e Q no aprendizado com o FKE.

Nota-se que, conforme o valor de R aumenta de 1 para 10 e o valor de Q diminui de 10^{-4} para 10^{-6} , o erro MAPE fica reduzido. Sendo assim, os valores adotados para o ajuste do filtro de Kalman estendido foram: $R = 10$ e $Q = 10^{-6}$.