

# Rede Neural Artificial para Previsão de Tempestades Magnéticas

Amita Muralikrishna<sup>1</sup>, José Demísio Simões da Silva<sup>2</sup>, Alisson Dal Lago<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Mestrado em Computação Aplicada – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

<sup>2</sup>Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC) - INPE

<sup>3</sup>Divisão de Geofísica Espacial (DGE) – INPE

amita.mk@gmail.com, demisio@lac.inpe.br, dallago@dge.inpe.br

**Resumo.** *A Terra sofre constante influência da atividade solar através do vento solar. Uma das conseqüências da relação Sol-Terra é a possível ocorrência de tempestades magnéticas, a qual é ditada pelas características das estruturas carregadas pelo vento solar, e de como elas interferem no comportamento do campo magnético interplanetário. A previsão de tempestades magnéticas e de sua intensidade permite alertar a sua ocorrência no planeta, uma vez que esses fenômenos podem ocasionar danos em sistemas tecnológicos no planeta, dentre outros prejuízos. Para realizar esta previsão, optou-se pela utilização de uma Rede Neural Artificial do tipo Perceptron Múltiplas Camadas, treinada com o algoritmo backpropagation, que preveja o comportamento geomagnético, medido pelo índice Dst, para a hora seguinte, informando a ocorrência ou não de uma tempestade magnética, bem como a sua intensidade.*

## 1. Introdução

O Sol tem uma ação constante sobre o campo magnético da Terra e dos demais planetas que fazem parte do seu sistema, através da emissão de um fluxo de plasma denominado vento solar. Este, quando se aproxima da Terra, encontra o campo geomagnético como um escudo, que consegue desviar a maior parte do fluxo. Dependendo das condições de algumas variáveis, parte dessa matéria pode ultrapassar essa barreira, influenciando no comportamento e nas características da atmosfera do planeta. Uma das possíveis conseqüências da relação Sol-Terra é a ocorrência de tempestades magnéticas. A previsão de tempestades magnéticas e de sua intensidade permite alertar a sua ocorrência no planeta, uma vez que estes fenômenos podem ocasionar danos em sistemas tecnológicos, dentre outros prejuízos.

Redes Neurais Artificiais (RNA), entre outras técnicas de Inteligência Artificial, têm sido exploradas em aplicações na área de Clima Espacial, auxiliando na solução de problemas não-lineares, paralelamente aos métodos estatísticos, matemáticos, entre outros, como na previsão de parâmetros do vento solar, componentes do campo magnético interplanetário e índices geomagnéticos. Bons resultados foram obtidos com a utilização de RNAs em previsão de tempestades geomagnéticas, medidas por índices geomagnéticos. Este trabalho teve como objetivo realizar a previsão de um desses índices, o Dst, em todo um período de dados, abrangendo tanto as horas perturbadas -

durante a ocorrência de tempestades de diferentes intensidades - como as calmas. Resultados satisfatórios foram obtidos com a implementação de uma RNA do tipo Perceptron Múltiplas Camadas, com uma camada intermediária, treinada com o algoritmo backpropagation, lançando na entrada valores das componentes do IMF e de plasma na hora atual, e esperando na saída a previsão do índice geomagnético Dst para a hora seguinte. Foi possível prever com maior precisão os períodos perturbados que os calmos.

## 2. Relação Sol-Terra

A Terra sofre constante influência do Sol através do chamado vento solar, constituído por plasma, que se desloca pelo espaço interplanetário com velocidades da ordem de 450 km/s [1]. Eventualmente ocorrem ejeções de plasma solar através de fenômenos explosivos conhecidos como ejeções de massa coronal [3], as quais podem ter velocidades entre 500 e 1500km/s, podendo levar de 2 a 3 dias para cruzar os 150 milhões de quilômetros que separam a Terra do Sol [2] [6]. Grande parte da matéria e energia dessas estruturas é desviada pela magnetosfera terrestre (Figura 1), camada que se forma pela interação entre o vento solar e o campo magnético da Terra.

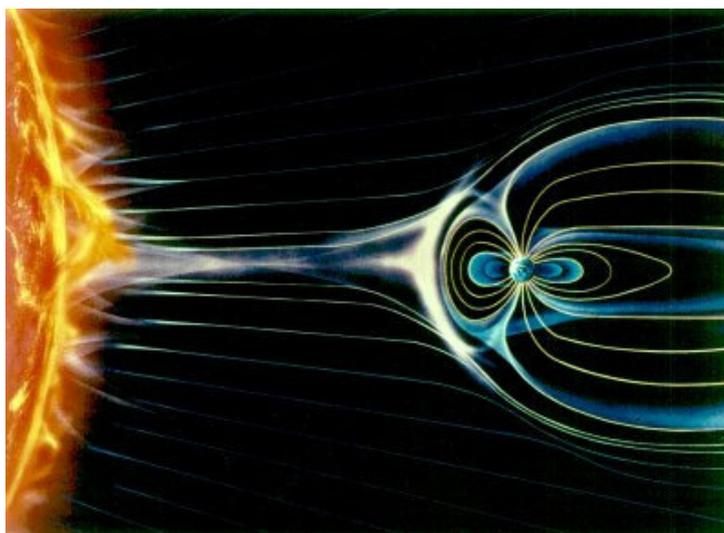
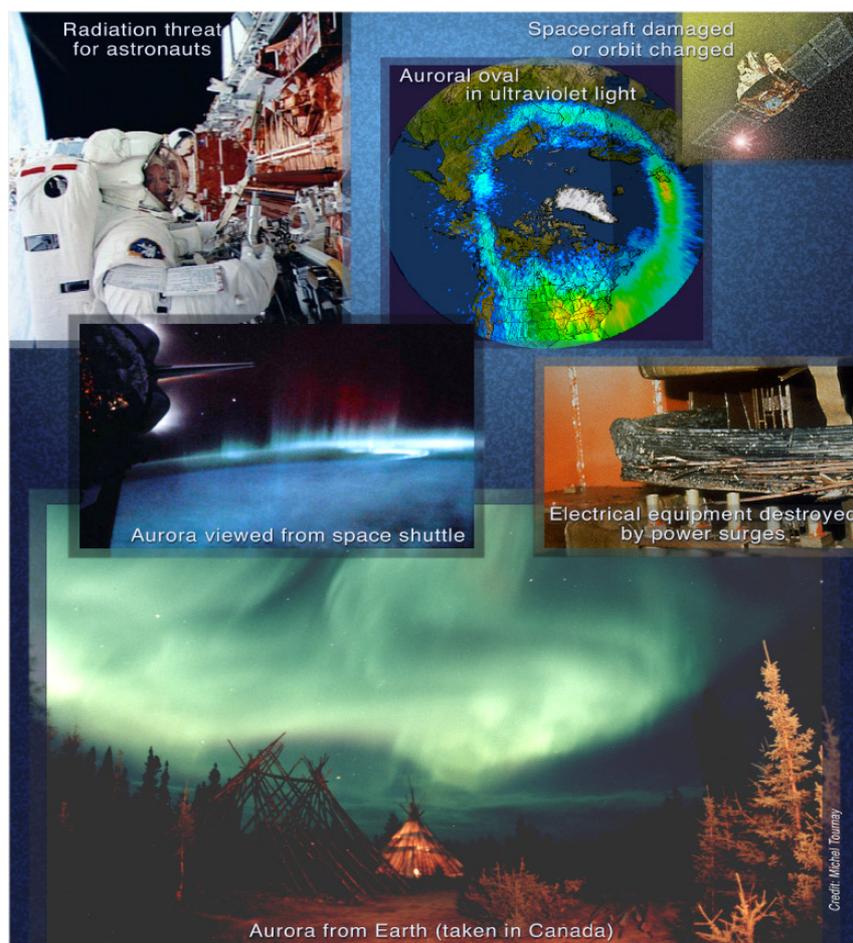


Figura 1. Ilustração do choque entre o vento solar e a magnetosfera.

A energia e a matéria não desviadas pelo campo magnético da Terra podem penetrar no planeta de variadas formas. De acordo com as suas características, estes processos podem ser imperceptíveis para a vida na Terra ou causar fenômenos e mudanças que se tornem visíveis ou até mesmo prejudiciais para as atividades no planeta, o que geralmente ocorre quando o vento traz consigo matéria proveniente de eventos de atividade intensa no Sol. Estes eventos podem ser explosões solares (ou *flares*), ejeções de massa coronais (EMC), entre outros, os quais a maioria libera matéria ionizada, da qual é constituída a atmosfera solar.

Além de influir na propagação das ondas de rádio, o vento solar pode influir no comportamento da atmosfera da Terra, pois as partículas carregadas podem alterar a ionização na alta atmosfera, quando há a ocorrência de tempestades magnéticas. Durante estes períodos, a radiação pode afetar os equipamentos eletrônicos dos satélites, prejudicando as comunicações. Os próprios satélites podem ser danificados ou perdidos. As camadas superiores da atmosfera se aquecem e se expandem e podem atingir a altura

de um satélite. O atrito pode, então, desacelerar o satélite e modificar sua órbita. Astronautas em órbita correm riscos de morte se estiverem expostos às chuvas de partículas de alta energia que são aceleradas durante os eventos solares mais intensos. Até passageiros de aviões podem sofrer algum risco. A Figura 2 ilustra as conseqüências citadas.



**Figura 2. Relação de algumas das conseqüências causadas pelas tempestades magnéticas: ameaças de radiação aos astronautas; ocorrência de auroras; danificação em equipamentos elétricos; satélites danificados ou com órbita alterada.**

Fonte: SOHO Portfolio - <http://sohowww.nascom.nasa.gov>

### 3. Desenvolvimento

Os dados utilizados no trabalho foram de plasma, de IMF e de índice Dst, coletados entre o período de 1998 a 2002. Os formatos e detalhes dos dados são descritos nos itens a seguir.

#### 3.1. Dados interplanetários

Os dados de plasma e IMF utilizados neste trabalho foram coletados pelo satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*), que tem sua órbita no plano Lagrangeano, o qual é caracterizado pelo ponto onde as forças gravitacionais do Sol e da Terra se anulam.

O satélite coleta dois tipos de dados: as características do plasma contido no vento solar que passa por ele, sendo essas características a temperatura ( $T_p$ ), a densidade

(Dp) e a velocidade (Vp) dos prótons; e as medidas das componentes Bx, By e Bz, além do B total (|B|), do IMF.

Os parâmetros interplanetários citados acima estão disponíveis em um mesmo arquivo de texto, em dois tipos de resolução: uma delas com um ponto a cada hora (utilizada neste trabalho), e a outra com um ponto a cada 64 segundos. A Figura 3 mostra todos os parâmetros citados acima para o mês completo de Outubro de 1999.

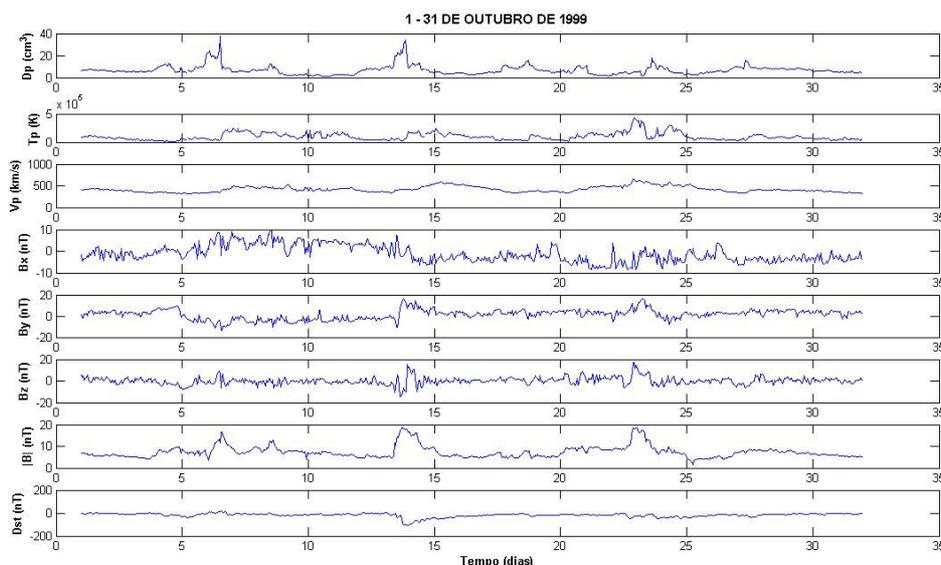


Figura 3. Parâmetros de entrada e saída da RNA.

### 3.2. Índices Geomagnéticos

O índice Dst (*Disturbance Storm Time*) é o índice que melhor identifica a ocorrência de uma tempestade. É derivado de quatro estações de magnetômetros de baixa latitude distribuídas em torno do mundo (Hermanus, Honolulu, Kakioka e San Juan), as quais medem de hora em hora a perturbação causada no componente horizontal ( $H$ ) do campo geomagnético. São as suas variações que definem as fases nas quais uma tempestade magnética é dividida.

## 4. Resultados de Previsões com RNA MLP

Para realizar a tarefa de prever tempestades geomagnéticas, foi implementada uma RNA Perceptron Múltiplas Camadas, com uma camada oculta, treinada com o algoritmo *backpropagation*.

Foram realizados testes com essa rede com diferentes configurações em relação aos dados de entrada e números de neurônios na camada oculta. Os parâmetros utilizados na entrada combinavam valores de velocidade do plasma, das componentes by e bz e do Dst em tempo  $t$  para a previsão do Dst em tempo  $t+1$  ou  $t+2$ , ou seja, buscando uma previsão com 1 ou 2 horas de antecedência. A componente bz do campo magnético interplanetário foi escolhida para os testes devido a estudos que comprovam a sua efetiva relação ao comportamento do campo magnético. [5]

Foram realizadas algumas séries de testes, tomando os parâmetros de entrada como diferencial entre elas. Todas elas tiveram o mesmo parâmetro de saída, Dst. Cada

série também teve um conjunto semelhante de testes no que diz respeito ao número de iterações e eventos para o treinamento e testes.

As medidas utilizadas para a análise da qualidade dos resultados da previsão foram:

- a) O coeficiente de correlação linear ( $\rho$ );
- b) O percentual de eficiência na previsão;
- c) A raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE, do inglês, *Root Mean Squares Error*).

Foram selecionados períodos de dados com ocorrência de tempestades de diferentes intensidades para a realização do treinamento da rede. Esses períodos foram separados em e identificados como relaciona a Tabela 1.

**Tabela 1. Relação de períodos selecionados para a fase de treinamento da rede.**

GRUPO	PERÍODO
DATA1	01 a 13/05/1998
DATA2	21 a 29/09/1998
DATA3	05 a 21/11/1998
DATA4	01 a 30/09/1999

A Tabela 2 relaciona e detalha os resultados dos principais testes realizados com diferentes conjuntos de treinamento.

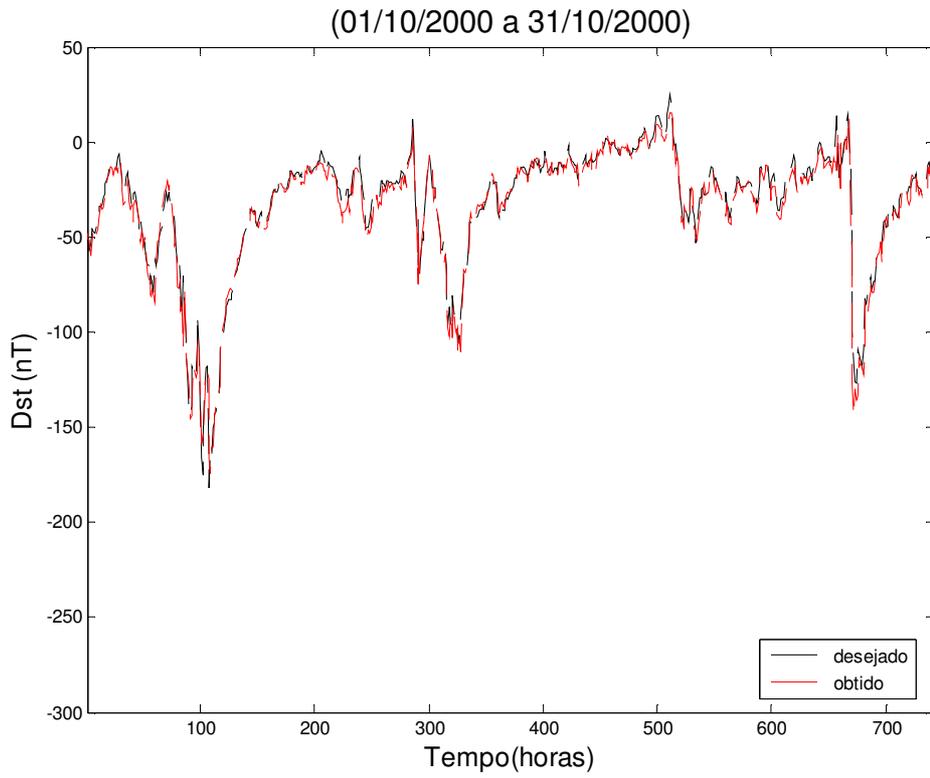
**Tabela 2. Relação dos principais testes realizados e os seus resultados.**

Nº da Série	Conjunto de Treinamento	Parâmetros de Entrada	Coefficiente de Correlação	% de Eficiência na Previsão	RMSE
1	DATA1, DATA2 e DATA3	Bz e Dst em t-1 e t-2	~ 0.98	~ 96.5%	~ 6 nT
2	DATA4	Bz, By e Dst em t-1 e t-2	~ 0.98	~ 94.5%	~ 7 nT
3	DATA4	Bz e Dst em t-2, t-3 e t-4	~ 0.95	~ 89.5%	~ 10 nT

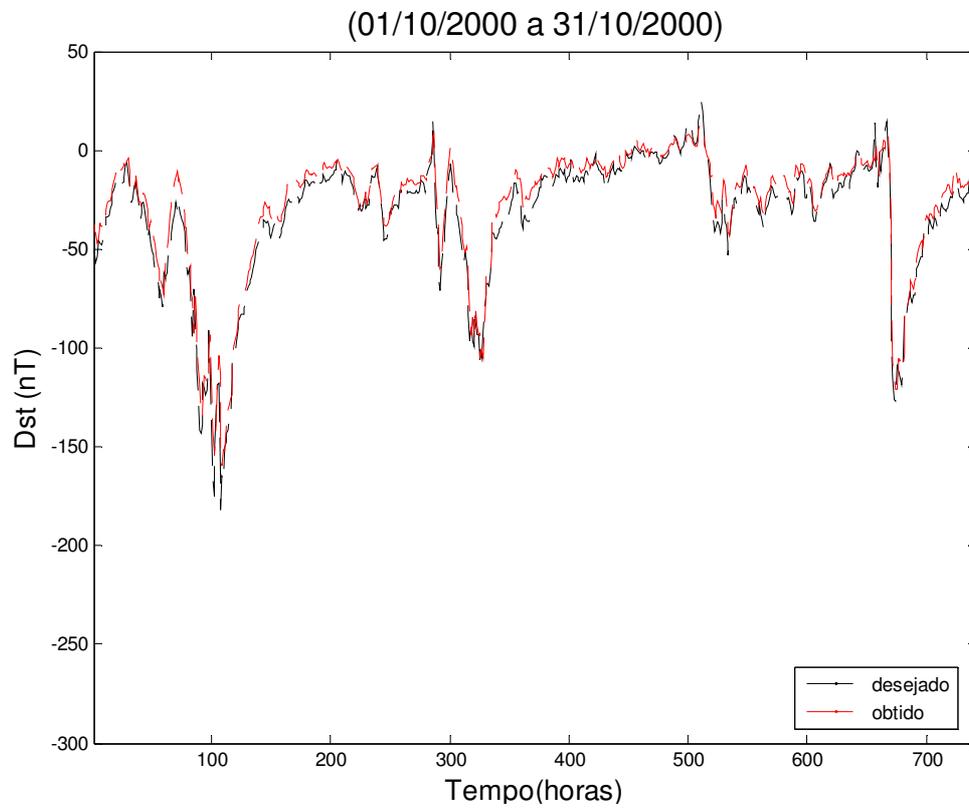
Os períodos utilizados para as fases de treinamento e teste foram conjuntos de dias, em que foi observada a ocorrência de uma ou mais tempestades de diferentes intensidades. Em todas as três séries, o mesmo período foi testado – 01 a 31 de Outubro de 2000.

As séries de testes que apresentaram melhores resultados foram as que utilizaram, juntamente com os valores de Bz, também valores de Dst na entrada. Os menores erros foram obtidos utilizando 4 neurônios na camada oculta.

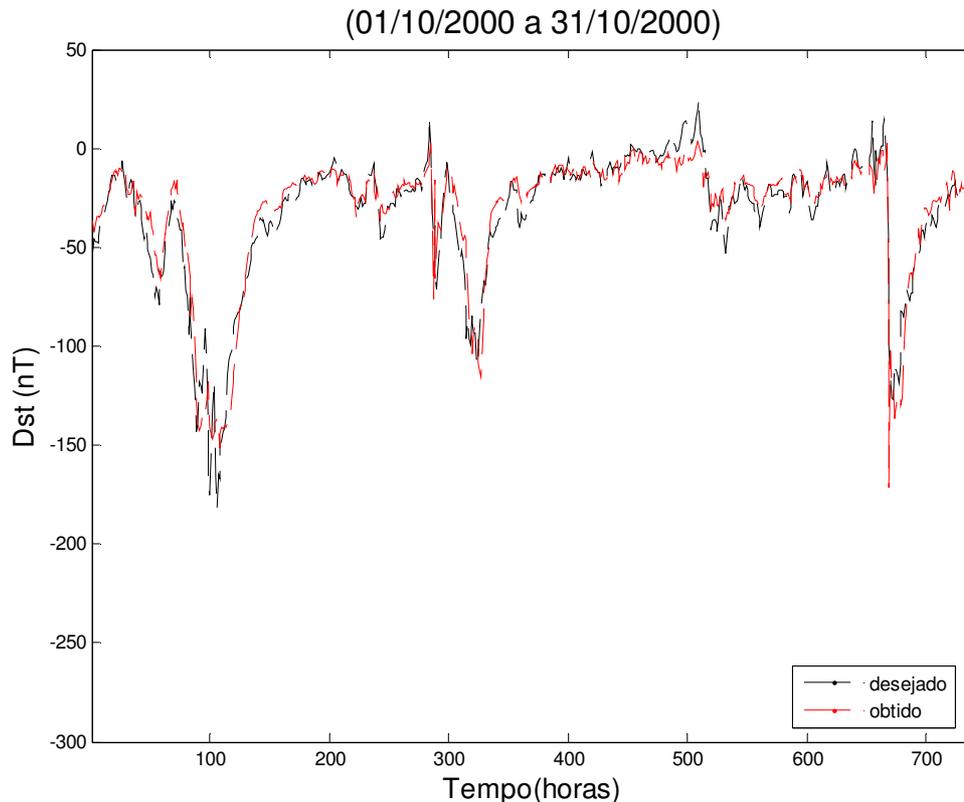
A Figura 4, a Figura 5 e a Figura 6 mostram gráficos com as curvas do Dst desejado e do calculado pela rede gradados, respectivamente, durante as série 1, 2 e 3.



**Figura 4. Resultado obtido durante a 1ª série de testes.**



**Figura 5. Resultado obtido durante a 2ª série de testes.**



**Figura 6. Resultado obtido durante a 3ª série de testes.**

#### **4.1. Comparação de Resultados obtidos com a rede MLP**

Wu e Lundstedt [7] utilizaram uma Rede Neural Elman para a previsão do índice Dst com 1 hora de antecedência e obtiveram a 85% de eficiência na previsão (ARV de 0.15) e um coeficiente de correlação entre o Dst observado e o previsto pela rede de 0.92.

Mais tarde, Wu e Lundstedt [8] avançaram o seu estudo para a previsão do Dst com 2 horas de antecedência. Obtiveram como resultado uma eficiência na previsão de 82%, chegando a obter 0.90 de coeficiente de correlação entre os dois sinais.

Kugblenu et al. [4] utilizaram uma RNA MLP com treinamento backpropagation para realizar a previsão do índice Dst com uma hora de antecedência. Como entradas, foram apresentados os parâmetros interplanetários B total e Bz do IMF e a Pressão Dinâmica – calculada em função da Densidade e da Velocidade de prótons do vento solar – em instante t-3, e Dst em instante t-1, t-2 e t-3, estando a saída desejada Dst no instante t. O melhor resultado conseguido no trabalho foi a previsão de uma tempestade (ocorrida em 19 de Dezembro de 1980), com ARV de 0.04, ou seja, com 96% de eficiência e RMSE de 11 nT. Um outro evento gerou um coeficiente de correlação de 0.96.

Verificou-se na previsão do índice Dst realizado no presente trabalho uma qualidade superior aos obtidos por Wu e Lundstedt [7] e [8] e semelhantes aos obtidos por Kugblenu et al.[4].

## 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

A RNA gerou bons resultados na previsão de tempestades magnéticas de diferentes intensidades, nas suas três fases, superando resultados obtidos em outros trabalhos presentes na literatura. No entanto, apresentou, em alguns casos, uma polarização na previsão de períodos calmos, em que o índice Dst apresenta valores perto de 0 (zero).

Foi possível observar que o estudo de caso não exige um conjunto grande de dados para a fase de treinamento, já que um período de dados de aproximadamente 5 (cinco) dias abrange tanto pontos calmos quanto pontos perturbados de diferentes intensidades.

Como seqüência ao trabalho, pretende-se:

- dar um foco maior aos períodos calmos, com o objetivo de obter uma previsão de qualidade para uma aplicação em tempo real;
- realizar mais testes com outros parâmetros, além dos que foram utilizados neste estudo.
- utilizar outras técnicas de IA em conjunto com as RNAs, e também explorar outras arquiteturas de redes neurais, para procurar, principalmente, outros resultados, como por exemplo, uma previsão com um tempo maior de antecedência.

## Referências

- [1] Brant, J. C. *Introduction to the solar wind*. San Francisco: W. H. Freeman, 1970. 216p.
- [2] Gosling, J. T.. *Coronal mass ejections: the link between solar and geomagnetic activity*. Phys. Fluids B 5, v.7, p.2638-2645, July 1993
- [3] Hundhausen, A. J. *An introduction*. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. *Coronal mass ejections*, Washington, DC: AGU, 1997. v. 99, p.1-7.
- [4] Kugblenu, S.; Taguchi, S. e Okuzawa, T. *Prediction of the geomagnetic storm associated Dst index using an Artificial Neural Network algorithm*, Earth Planets Space, vol. 51, pp. 307-313, Japan, 1999.
- [5] Muralikrishna, A. ; Santos, R. D. C. ; Dal Lago, A. ; Silva, J. D. S.. *Busca de Regras para Previsão de Tempestades Geomagnéticas Utilizando Técnica de Mineração de Dados*. In: V WORCAP - Workshop dos Cursos de Computação Aplicada, 2005, São José dos Campos. Proceedings do V Worcap, 2005. p. 1-4.
- [6] Schwenn, Rainer; Dal Lago, A.; Huttenen, Emilia & Gonzalez, Walter D.. *The association of coronal mass ejection with their effects near the Earth*. Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrospheres And Space Sciences, v. 23, n. AG/2004180, p. 1033-1059, 2005.
- [7] WU, J.-G. e LUNDSTEDT, H. *Prediction of geomagnetic storms from solar wind data using Elman Recurrent Neural Networks*, Geophys. Res. Letters, 23, 319-322, 1996.
- [8] WU, J.-G. e LUNDSTEDT, H. *Geomagnetic storms predictions from solar wind data with the use of Dynamic Neural Networks*, J. Geophys. Res. 102, 14225, 1997.