

Autômatos Finitos Não-Determinísticos para Diagnóstico de Falhas em Sistemas de Potência

Ricardo Linden¹

Victor Navarro Araújo Lemos da Silva²

Resumo: Este artigo apresenta uma proposta de uma aplicação baseada em autômatos finitos não determinísticos para diagnóstico de falhas em sistemas de potência. São apresentados os autômatos de alguns casos simples de um sistema de transmissão de energia e a comparação das características computacionais do sistema proposto com sistemas especialistas.

Palavras Chave: Autômatos Finitos, Diagnóstico Falhas, Sistemas de Potência

Abstract: This paper introduces an application based on finite non-deterministic automata for power systems diagnosis. Automata for the simpler faults are presented and the proposed system is compared with an established expert system.

Keywords: Finite Automata, Power Systems, Fault Diagnosis

¹ Faculdade Salesiana Maria Auxiliadora (FSMA-RJ)
R Monte Elíseo S/Nº CEP 27943-180 Macaé, RJ
{rlinden@pobox.com}

² CEPEL - Av. Jequitibá, 355 Cidade Universitária CEP 21941-590 Rio de Janeiro, RJ
{navarro@cepel.br}

1. Introdução

O modelo atual de operação dos sistemas de potência vem exigindo o desenvolvimento de técnicas cada vez mais sofisticadas para supervisão, controle, proteção e automação com o objetivo de garantir um funcionamento seguro e confiável.

No momento em que ocorrem distúrbios em sistemas elétricos, a quantidade de alarmes é elevada, o que faz com que o operador tenha dificuldade em determinar as causas destes distúrbios (diagnóstico) e determinar as ações corretivas a serem executadas. Devido a estes problemas, existe um interesse cada vez maior no desenvolvimento de sistemas que possam auxiliar o operador no diagnóstico das falhas que geraram os alarmes.

Diagnóstico de falhas é o nome do processo de descobrir a causa de distúrbios, ou seja, comportamentos de um sistema de potência que não sejam aqueles esperados em situações normais. Este é um campo de estudos que tem merecido ampla atenção e no qual há vários artigos que aplicam diversas áreas de conhecimento, tal como lógica fuzzy [1], redes neurais [2], diagramas de decisão [3] e sistemas especialistas [4].

Neste artigo será proposta a aplicação de autômatos finitos para diagnóstico em sistemas de potência. Como necessitamos de transições vazias para descrever a perda de alarmes, os autômatos usados serão do tipo finito não determinístico. Na seção 2 serão descritos os autômatos finitos, na seção 3 a aplicação destes a um corte típico de um sistema de potência, e na seção 4 conclui-se com alguns comentários finais e direções futuras.

2 Autômatos e Transdutores de Estados Finitos

Os autômatos finitos constituem um modelo útil para muitos elementos de hardware e de software. Eles servem como modelos de sistemas que a cada momento podem estar em um de um número finito de estados, elementos que definem as características atuais, além de memorizar parte da história do sistema [5]. Conforme o sistema recebe entradas, ela faz a transição de um estado para outro, até o momento em que deixa de receber entradas. Neste momento, se ele se encontra em um estado que pertence ao conjunto de estados finais, ele considera que a entrada foi aceita.

Formalmente, um autômato é descrito por cinco características:

1. um conjunto finito de estados, K ,
2. um alfabeto de entrada finito, Σ ,
3. um conjunto de transições, δ ,
4. um estado inicial, S , onde, $S \in K$
5. um conjunto de estados finais, F , onde $F \subseteq K$

Assim, pode-se representar totalmente um autômato finito através de uma quintupla $M = \{K, \Sigma, \delta, S, F\}$.

As transições são representadas por triplas $\{s_i, \Sigma_T, s_f\}$, onde s_i é um estado inicial da transição, Σ_T é o conjunto de símbolos do alfabeto (caracteres) que disparam esta transição quando o estado corrente é s_i e s_f será o novo estado corrente do autômato após a transição. Se para cada elemento de Σ existe apenas uma transição e se nenhuma transição pode ser feita sobre a entrada vazia, isto é, $\epsilon \notin \Sigma_T$, então o autômato é dito determinístico (AFD). Caso contrário ele é dito não-determinístico (AFND).

Autômatos são usualmente representados na forma de um grafo dirigido, onde estados são representados por círculos, sendo que estados finais são representados por círculos duplos, e as transições por arestas rotuladas com os símbolos que disparam a transição entre os dois estados conectados (Figura 1)

Neste trabalho será usado um transdutor de estados finitos não determinístico (TEFND), que é muito semelhante a um AFND, mas com a diferença de que sua função não é a de aceitar cadeias ou linguagens, mas transformar cadeias de entradas em cadeias de saída. Em cada estado o TEFND emite (ou escreve em uma fita de saída) uma cadeia de símbolos, como função do estado atual e do símbolo corrente de entrada [6]. No caso do TEFND descrito neste artigo, todos os estados não finais emitem uma cadeia de zero símbolos, enquanto que os estados finais emitem o diagnóstico da falha que eles modelam. Em todas as figuras que descrevem o TEFND criado, as cadeias emitidas serão omitidas apenas por uma questão de simplicidade.

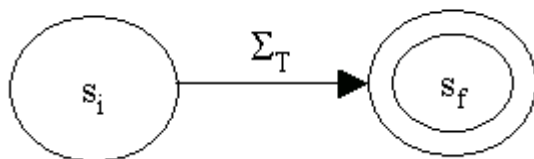


Figura 1 : Representação gráfica da transição $\{s_i, \Sigma_T, s_f\}$. O círculo do estado s_f é duplo pois ele pertence ao conjunto F de estados finais.

3 Aplicação em Sistemas de Potência

Os sistemas de potência têm uma estrutura hierarquizada. As várias subestações se interligam através de linhas de transmissão e algumas delas podem fornecer energia aos consumidores finais. Estas possuem vários disjuntores em suas saídas, que servem para isolar as linhas de distribuição de energia, ou alimentadores. Estes alimentadores saem das subestações e levam energia para os consumidores finais.

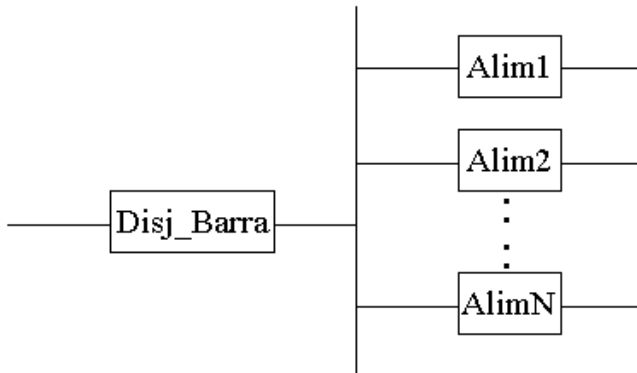


Figura 2: Seção típica de um sistema de transmissão. O disjuntor Disj_Barra faz a proteção da barra, aos quais estão ligadas as linhas de transmissão para os consumidores, devidamente protegidas pelos alimentadores Alim1, Alim2, ..., AlimN.

Nesta seção será discutida a aplicação dos TEFND a um corte típico de um sistema de transmissão, mostrado na figura 2. Este corte consiste em uma barra à qual são ligados os alimentadores que tem religadores que podem isolá-los. Tipicamente, esta barra é isolada do resto do sistema por um disjuntor, que faz a sua proteção.

Existe uma falha em uma das linhas dos alimentadores que leva a uma seqüência de alarmes dada por um disparo da proteção do alimentador, seguida de um disparo definitivo e uma abertura de um disjuntor. O TEFND capaz de modelar tal transição é dado na figura 3.

Esta modelagem é simples, mas inexata. Em sistemas reais, os alarmes podem vir fora de ordem ou até mesmo serem perdidos devido a problemas de comunicação ou falhas de proteção. Assim, é necessário um TEFND capaz de reconhecer a existência da ocorrência da falha mesmo quando um alarme é perdido. Na figura 4 pode-se ver um TEFND capaz de modelar a falha mesmo em caso de perda de um dos alarmes de disparo da proteção ou de disparo definitivo. A perda dos dois alarmes não precisa ser considerada, tendo em vista a baixa probabilidade de ocorrência, mas para fazê-lo, basta incluir uma ε -transição do estado q_0 para o estado q_3 . A perda do alarme de abertura do disjuntor não deve ser considerada, pois ela é fundamental para definir a ocorrência: sem ela, pode-se estar descrevendo outra falha, como será visto a seguir.

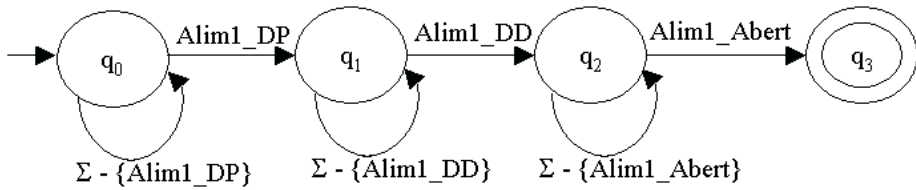


Figura 3: TEFND capaz de modelar uma falha em uma das linhas dos alimentadores. O estado q_3 emite a mensagem de erro (“Falha no alimentador 1”). Como o religador só é sensível a alarmes relativos às suas falhas, todos os outros alarmes são ignorados. Isto pode ser visto pelas setas que não causam mudança de estado e que são rotuladas com todos os alarmes, com exceção daquele de interesse para o estado corrente. Estas setas serão omitidas nas próximas figuras para simplificar os desenhos, mas elas sempre estão presentes.

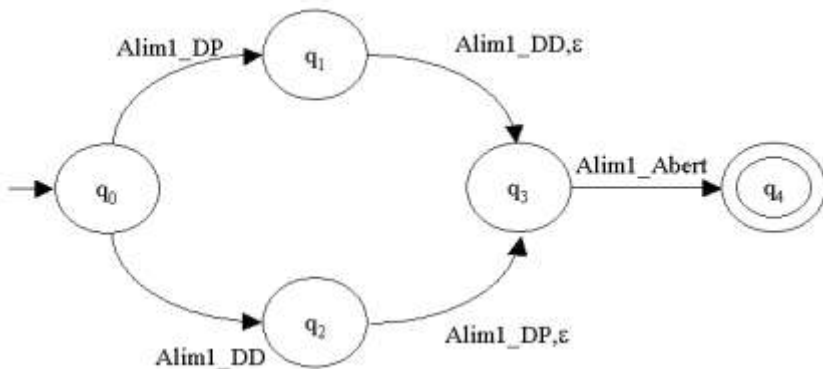


Figura 4: TEFND capaz de modelar uma falha em uma das linhas dos alimentadores, levando em consideração a possível perda do alarme de disparo da proteção ou do alarme de disparo definitivo. As transições para o próprio estado rotuladas pelos outros alarmes foram omitidas para simplificação.

Existem falhas na barra que causam a mesma seqüência de eventos de falhas nas linhas, logo podem ser descritas de forma precisa pelos autômatos da figura 4. Entretanto, existe um outro tipo de falha, especificamente a falha da barra causada por defeito na linha que deve ser considerada. Neste caso, uma falha na linha causa o disparo da proteção e do disparo definitivo do alimentador e este, por algum motivo tal como uma falha mecânica, deixa de isolar a linha defeituosa. Este defeito então se propaga pela barra, causando o disparo do disjuntor da barra. O transdutor de estados capaz de reconhecer este tipo de

situação é similar àquele mostrado na figura 4 com a diferença de que o alarme que leva à transição do estado q_3 para o estado q_4 é a abertura do disjuntor da barra (Disj_Barra_Abert).

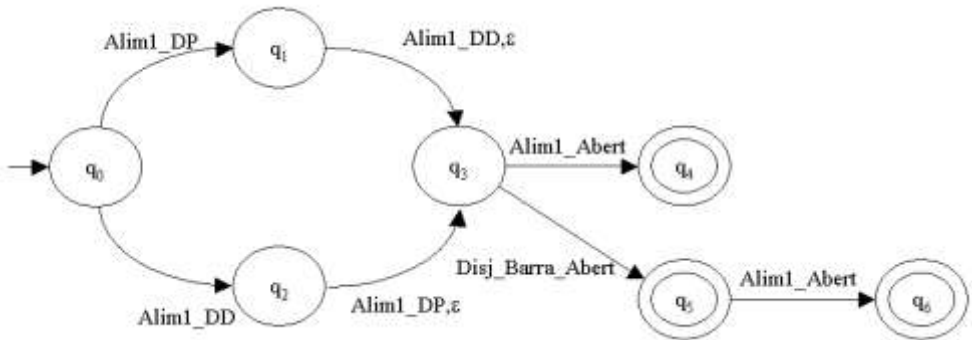


Figura 5: TEFND que descreve a situação de perda do alimentador por defeito no mesmo (estados finais q_4 e q_6), perda da barra por defeito no alimentador (estado final q_5) e perda na barra por defeito na barra (q_6). Note-se que o estado q_6 representa a ocorrência de duas falhas simultaneamente.

Quando se deseja modelar as duas falhas possíveis simultaneamente (falha no alimentador e falha na barra por defeito no alimentador), obtém-se o TEFND descrito na figura 5. Neste adicionaram-se dois estados: q_5 , que representa a falha na barra por defeito no alimentador e q_6 , que representa a chegada tardia do alarme de abertura do religador. Neste caso, ter-se-á uma situação em que ocorreram duas falhas simultaneamente, a perda da barra por defeito na barra (q_6) e a perda da barra por defeito no alimentador (q_5).

Para concluir a modelagem, é necessário colocar o autômato da figura 5 (doravante denominado L_1) junto com o autômato da figura 4, com os alarmes associados ao disjuntor de barra (doravante denominado L_2), pois eles podem ocorrer de forma paralela. Isto é conseguido através da realização do autômato $L_1 \cup L_2$, cuja definição formal é dada por $M = \{ K, \Sigma, \delta, S, F \}$, onde temos:

1. $K = K_{L1} \times K_{L2}$
2. $\Sigma =$ todos os alarmes possíveis no sistema.
3. $S = (q_{0L1}, q_{0L2})$, o par ordenado dos estados iniciais.
4. $F =$ todos os estados de K que contêm ao menos um estado final em seu par.
5. $\delta =$ função de transição definida da seguinte maneira:

$$\delta((q_{L1}, q_{L2}), a) = (p_{L1}, p_{L2}) \Leftrightarrow \delta(q_{L1}, a) = p_{L1} \wedge \delta(q_{L2}, a) = p_{L2}$$

$$\text{onde possivelmente } q_{L1} = p_{L1} \vee q_{L2} = p_{L2}.$$

O problema desta definição é que o número de estados do autômato definido é igual ao produto do número de estados de cada um dos autômatos anteriores. Isto implicaria em um número extremamente grande de estados para todo o sistema, com n alimentadores.

A vantagem do sistema hierarquizado é que falhas no alimentador i não afetam o alimentador j , $\forall i, j=1, \dots, n, i \neq j$. Logo, basta realizar um transdutor de estados como descrito acima para cada um dos alimentadores. Logo o número de estados total no sistema não é um produto do número de estados de cada alimentador, mas sim um somatório, o que é várias ordens de grandeza menor. Ademais, o transdutor de estados de cada alimentador executa em um tempo cuja ordem de grandeza é igual ao número de alarmes existentes.

A independência dos alimentadores permite também que a sua implementação seja completamente independente e que, por conseguinte, a implementação seja totalmente paralelizada, podendo ser feita tanto com o uso de threads independentes ou mesmo em máquinas e/ou processadores independentes, sem a necessidade de memória compartilhada ou qualquer outro tipo de comunicação entre os autômatos.

4 Conclusão

Neste trabalho foi proposta uma modelagem baseada em transdutores de estados finitos não determinísticos para o problema do diagnóstico de falhas em sistemas de potência. Devido à natureza dos transdutores de estados finitos, o tempo entre o aparecimento do alarme e o diagnóstico é curto, pois o tempo de resposta destes é função apenas do número de alarmes recebidos.

É importante destacar que cada um destes transdutores pode trabalhar de forma independente em relação aos outros autômatos do sistema. Isto permite que o modelo seja implementado de forma maciçamente paralela, dando-lhe a capacidade de uma performance excelente, mesmo nos casos em que a rede de transmissão seja muito complexa.

Esta característica não é compartilhada pelos sistemas especialistas, como os propostos em [7]. Estes precisam de um motor de inferência cujo funcionamento é computacionalmente custoso e, dada a natureza seqüencial do funcionamento deste motor, é impossível paralelizar seu funcionamento. A solução seria paralelizar a base de conhecimento, mas posto que o motor de inferência é tão “pesado”, não é computacionalmente viável colocar vários deles em execução simultaneamente.

5 Bibliografia

[1] HUANG, Y. C., YANG, H. T., HUANG, C. L., 1997, "Developing a new transformer fault diagnosis system through evolutionary fuzzy logic," *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 12, n. 2, pp. 761-767.

- [2] WANG, Z., LIU, Y., GRIFFIN P. J., 2000, “Neural Net and Expert System Diagnose Transformer Faults”, IEEE Computer Applications in Power, pp.50-55, Janeiro
- [3] MOORE M., MONEMI S., WANG J., 2000, “Integrated Diagnostics for Electric Utilities”, World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, pp. 458-463, Orlando, Julho.
- [4] SILVA, V. N. A. L.; RIBEIRO, G. F.; LINDEN, R. *et al.*, 2003, “Sistemas Inteligentes Híbridos Para Diagnose No Coi Da Cosern”, Anais do VII Seminário Técnico de Proteção e Controle, Rio de Janeiro, Junho
- [5] HOPCROFT, J. E.; MOTWANI, R.; ULLMAN, J. D., 2003, “Introdução à Teoria de Autômatos, Linguagens e Computação”, 2^a. Edição, Editora Campus, Brasil
- [6] LEWIS, H. R., PAPADIMITRIOU, C. H., 1998, “Elementos de Teoria da Computação”, 2^a. Edição, Ed. Bookman, Brasil
- [7] SILVA, V. N. A. L.; RIBEIRO, G. F.; LINDEN, R. *et al.*, 2004, “Real-Time Expert System Integrated To Cosern’s IOC”, IX Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE), Rio de Janeiro, Maio