

# Matrizes de Dependências Aplicadas ao Controle de Disponibilidade em Usinas Hidrelétricas

Gustavo M. Alfaro e Dany S. Dominguez

Nível de Mestrado

Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia  
Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Santa Cruz,  
Rodovia Jorge Amado, km 16, 45.662-900, Ilhéus-BA.

[gmonne@live.com](mailto:gmonne@live.com), [dsdominguez@gmail.com](mailto:dsdominguez@gmail.com)

Ingresso: Março 2013

Conclusão: Fevereiro 2015

Etapas concluídas: disciplinas (03/2013 a 12/2013), proficiência em língua estrangeira (12/2013), pesquisa bibliográfica (04/2013 a 06/2013), resultados preliminares (07/2013 a 02/2014)

Etapas futuras: exame de qualificação (08/2014), defesa da dissertação (02/2015)

**Abstract.** *Systems for power generation are among the largest and most complex industrial sectors in the world. Particularly in Brazil, electricity generation is dominated by Hydropower Plants; for this reason is necessary ensure a correctly operation of this facilities. This paper presents a methodology based on the use of Dependency Matrix Method, which proposes the application of sweep algorithms or dependency spread over the matrix formed by the elements of the analyzed system. While the algorithm is executed, the dependencies matrix undergoes changes the states of the elements, represented in qualitative scale, which vary according to the properties and characteristics of the components that form the system to obtain the availability state.*

**Keywords:** *Hydropower Plants, Dependencies Matrix Method, Sweep Algorithms.*

## 1. Problema de pesquisa e caracterização da contribuição

Na atualidade, o crescimento da economia e da população mundial está diretamente relacionado ao consumo de energia, elemento que contribuiu a fazer dos sistemas de geração e transmissão de energia uns dos setores industriais mais complexos em operação. No Brasil, o setor energético foi decisivo no desenvolvimento econômico alcançado nos últimos anos, liderado basicamente pelas usinas de geração hidroelétrica, que representam um 75,2% da geração total de energia elétrica no Brasil segundo [Ministério de Minas e Energia, 2013].

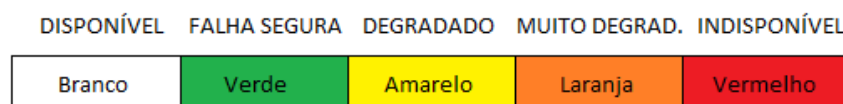
A geração hidrelétrica destaca-se pelo baixo custo e impacto ambiental consideravelmente inferior a outras formas de produção. Em detrimento, estes sistemas são caracterizados pela constante degradação de seus componentes produto do regime adverso de trabalho [Wang, 2002]. Razão pela qual estes sistemas devem ser rigorosamente monitorados por operadores e analistas de manutenção, tentando minimizar o acontecimento de falhas que provoquem interrupções no serviço elétrico.

Visando apoiar os trabalhos de operação e manutenção, tem sido desenvolvidas na indústria várias metodologias e modelos de simulação que avaliam a disponibilidade e confiabilidade de sistemas [Domingues, 2011], [Wang, 2004]. Estas ferramentas tem sido aplicadas em conformidade com normativas tais como Manutenção Orientada por Confiabilidade [Wang, 2002], e Gerenciamento de Ativos Físicos [PASS 55, 2008].

No presente trabalho é apresentado um método qualitativo, baseado no uso de matrizes de dependências e técnicas de varredura, para avaliar a disponibilidade de sistemas de usinas hidrelétricas. A implementação deste método envolve elementos computacionais como representação de matrizes irregulares, ordenação e algoritmos de propagação de dependências.

## 2. Fundamentação teórica e trabalhos relacionados na área (visão comparativa)

O Método de Matrizes de Dependências (MMD), [Fornari, 2013], aplicado na avaliação de disponibilidade, constitui uma ferramenta qualitativa capaz de fazer uma caracterização contínua da disponibilidade do sistema avaliado, mediante a representação tabelada dos elementos do sistema analisado e o uso de escalas qualitativas de disponibilidade. A escala de disponibilidade define o estado do componente conforme a Figura 1. Este método tem como vantagem o baixo consumo de recursos computacionais e a fácil interpretação dos resultados.



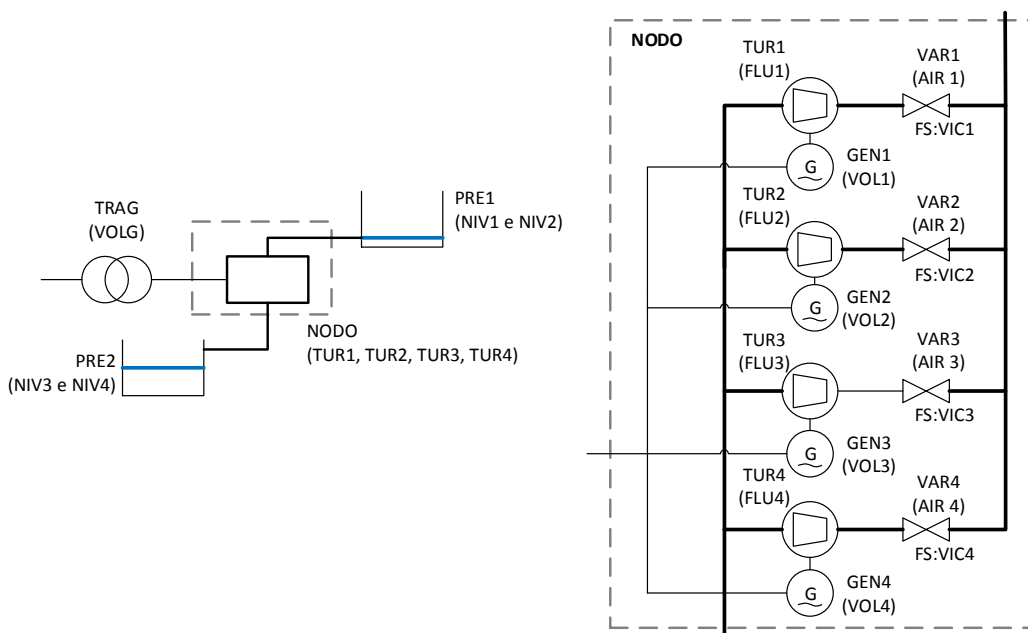
**Figura 1. Escalas qualitativas de disponibilidade.**

A metodologia em questão tem seu arcabouço principal nas Matrizes de Dependências (MD), onde cada célula destas estruturas representa um componente do sistema analisado, e pode ser identificado por um código alfanumérico único [Dominguez, 2013]. Esses elementos classificam-se como Componentes de Baixo Nível (CBN), equipamentos; e Componentes de Alto Nível (CAN), representações dos subsistemas e sistemas da planta.

Todos os componentes da matriz ocupam uma posição definida pela relação funcional de dependência estabelecida entre os grupos mencionados. De forma tal que cada CAN identifica

uma linha da MD, e as colunas envolvem as dependências correspondentes, que podem ser CBNs ou outros CANs.

A Figura 2 constitui a representação simplificada de uma pequena Usina Hidrelétrica, composta por dois reservatórios, um a montante PRE1 e outro a jusante PRE2, os quais dependem dos níveis de água NIV1, NIV2 e NIV3, NIV4, respectivamente. O bloco central está formado por quatro linhas de geração, é denominado NODO, e dele dependem os elementos TUR1, TUR2, TUR3 e TUR4; finalmente um transformador de saída denominado TRAG dependente da voltagem VOLG.



**Figura 2. Representação simplificada de uma Usina Hidroelétrica**

Na Tabela 1 ilustra-se a MD associada ao sistema apresentado na Figura 2, onde os CANs podem ser identificados por apresentarem o caractere “@” como prefixo no seu código de identificação. Além de apresentar esta característica, os componentes podem apresentar outro prefixo para diferenciá-los como componentes que apresentam características especiais. Esses componentes são tratados de forma diferenciada pelo algoritmo de propagação de dependências [Moreira, 2013], ou algoritmo de varredura.

**Tabela 1. Representação parcial da Matriz de dependências (MD) do problema modelo.**

Equipamento	Dependência 1	Dependência 2	Dependência 3	Dependência 4
@SM	@PRE1	@NODO	@PRE2	@TRAG
@TRAG	VOLG			
@PRE1	R1:NIV1	R2:NIV2		
@NODO	R1:@TUR1	R2:@TUR2	R3:@TUR3	R4:@TUR4
@PRE2	NIV3	NIV4		

De acordo com as dependências funcionais os componentes podem operar em série, sendo chamados elementos únicos, e passando seu estado diretamente ao subsistema CAN ao qual pertencesse; caso contrário podem funcionar de forma redundante ou em paralelo onde o estado propagado vai depender do número de elementos redundantes e um critério de redundâncias

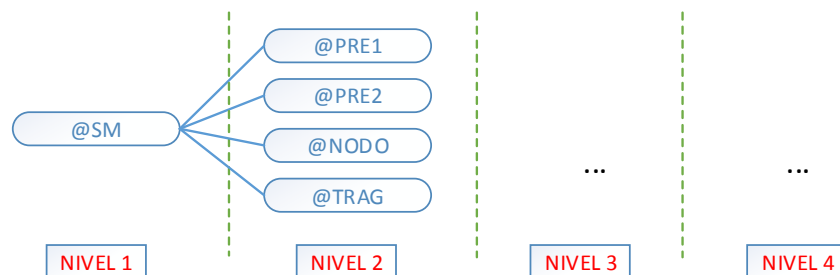
previamente estabelecido. Os componentes redundantes possuem o prefixo “R<sub>i</sub>”, com  $i = 1, 2, 3... n$ , sendo  $n$  o número máximo de redundâncias, [Dominguez, 2012].

## 2.1 Mecanismo para ordenação da MD

Analisar algoritmos, constitui o melhor caminho para prever os recursos necessários que um programa vai precisar para funcionar corretamente tais como tempo de execução e uso de memória, [Cormen 2001], daí que uns dos principais benefícios obtidos destas análises seja a eficiência dos algoritmos.

Neste sentido, após avaliar os algoritmos de varredura encargados de propagar os estados dentro da MD, concluiu-se que a eficiência da metodologia proposta vai depender fortemente da ordenação das linhas dentro da MD. Por este motivo, e utilizado um mecanismo de classificação, que atribui uma posição única às linhas da MD, determinada pelo nível da dependência. Este mecanismo contribui no aumento da eficiência do método já aplicado sem ordenação em plantas nucleares em [Torres 2010].

Os níveis de dependência são valores inteiros dados as linhas ou subsistemas que formam a MD, de acordo à posição ocupada por eles dentro da árvore hierárquica que representa a estrutura do sistema. Embora a ordenação da matriz seja guiada por uma sequência lógica, os elementos de um mesmo nível de hierarquia podem aparecer em ordem aleatório, o que não vai afetar os mecanismos de varredura do MMD. A Figura 3 representa os primeiros níveis da matriz apresentada na Tabela 1.



**Figura 3. Representação parcial dos níveis de dependência dos elementos do sistema**

O Número de Operações do Algoritmo (NOA), associado por alguns autores com o tempo de execução, pode ser aproximado pela frequência de execução da operação dominante [Cormen, 2001], dessa forma o custo da ordenação das linhas da matriz de dependências vai ser definido pela expressão:

$$NOA^{ORD} = N_{CAN}^2 N_{DEP} + N_{CAN}^2 N_{DEP}^2 \Rightarrow O(N_{CAN}^2)$$

onde  $N_{CAN}$  é o número de CAN do sistema, e  $N_{DEP}$  é o número máximo de dependências para um CAN na MD, como  $N_{CAN} \gg N_{DEP}$ , o algoritmo apresenta complexidade quadrática.

## 2.2 Detalhes do algoritmo de varredura ou propagação de dependências

A execução do algoritmo de propagação de dependências precisa que todos os componentes sejam considerados, inicialmente, disponíveis. A partir disto, tendo como dados de entrada, uma lista de componentes indisponíveis denominado vetor de estados, e a MD, executa-se o algoritmo de varredura. O algoritmo é dividido em duas etapas: (i) a varredura simples ou direta, e (ii) a varredura complexa ou indireta.

Durante a primeira etapa (varredura direta), a MD é percorrida no sentido Top-Down. Em cada linha percorrida é verificada a existência dos componentes CBN indisponíveis. Quando o elemento for encontrado, é marcado como indisponível e propagado o estado até o CAN que representa a linha, e colorido de acordo aos critérios da escala de disponibilidade previamente descritos (vide Figura 1). Na segunda etapa do algoritmo (varredura indireta), a MD será varrida na forma Bottom-Up, realizando a propagação dos estados dos CANs afetados na primeira etapa. Este processo será realizado entre as linhas da MD até atingir a primeira linha, a qual identifica o sistema avaliado. A complexidade do algoritmo incluindo ambas as etapas é definida pela expressão:

$$NOA^{MMD} = N_{CAN}N_{DEP}N_{FAL} + (N_{CAN})^2N_{DEP} \Rightarrow O(N_{CAN}^2)$$

também de complexidade quadrática onde  $N_{FAL}$  é o número de elementos falhados do sistema.

No âmbito de análises de disponibilidade e confiabilidade, existem diversas técnicas encaminhas ao estudo de sistemas elétricos de potência, entre as mais importantes destacam-se: Árvore de Falhas, Reliability Block Diagram, Árvore de Eventos, Monte Carlo, entre outras. Em [Volkanovsky, 2009] foi descrito um procedimento para avaliar confiabilidade em sistemas fornecedores de energia utilizando as análises de Árvores de Falhas, metodologia baseada em álgebra booleana e probabilidades.

Outras técnicas estão relacionadas a métodos estocásticos, inteligência artificial e sistemas distribuídos, como é descrito no estudo feito em [Silva, 2012]. Neste trabalho apresenta-se a avaliação de confiabilidade em sistemas de potência utilizando simulações com o método de Monte Carlo e Sistemas Multi-Agentes.

A vantagem do método MMD, proposto no presente trabalho, sobre a maior parte destas técnicas conhecidas, é a simplicidade de funcionamento e a fácil interpretação dos resultados de disponibilidade do sistema em cada momento. Entretanto, a técnica proposta não inclui uma análise exaustiva de todas as situações de risco que podem afetar o funcionamento do sistema analisado, tais como influencias externas ou erros humanos.

### **3. Estado atual do trabalho**

A elaboração do trabalho que deu origem ao presente artigo está composto por várias etapas entre as quais destacam-se o desenvolvimento de duas técnicas para o análises de confiabilidade e disponibilidade, especificamente adaptadas para avaliar cascatas de usinas hidrelétricas, a implementação computacional, e as fases validação e testes de desempenho.

O primeiro dos métodos (MMD), apresentado neste trabalho, foi testado com sucesso, mediante a resolução de vários problemas modelos. Na atualidade, a segunda metodologia, de caráter quantitativo, e baseada em propagações de Markov encontra-se na fase de validação, a fim de corroborar o modelo matemático proposto e a correta implementação computacional do método.

### **4. Desenvolvimento necessário para a conclusão**

Após superadas as etapas de desenvolvimento das metodologias de análises de disponibilidade e implementadas numa linguagem de programação. O seguinte passo, necessário para à conclusão do trabalho, consiste nos testes e validações dos métodos propostos, tendo como

parâmetros o desempenho computacional dos algoritmos construídos e as respostas das heurísticas e modelos matemáticos na avaliação dos estudos de caso.

Como já foi dito, a primeira metodologia apresentada já concluiu a maior parte das etapas de prova, e no momento trabalha-se na avaliação do segundo método desenvolvido, razão pela qual não foi incluído no presente artigo. Após esta validação será feita uma comparação entre as duas metodologias, e posteriormente será feito com outras já reconhecidas no âmbito de análises de disponibilidade em sistemas industriais.

## 5. Avaliação dos resultados

Para validar e verificar o MMD proposto neste trabalho foram resolvidos diversos problemas modelos que representam simplificações de empreendimentos e cascatas de hidrelétricas. Os testes consistiram na simulação de falhas de alguns CBN para observar a resposta do MMD nestas situações. Em todas as simulações realizadas os resultados obtidos pelo MMD foram satisfatórios e corresponderam com o estado de disponibilidade global do sistema. A coerência dos resultados foi comprovada pelas análises da matriz de dependência resultante, e pela comparação com o Método de Árvore de Falhas, [Wang, 2004]. As estruturas de dados e os algoritmos implementados para o MMD oferecem melhor desempenho computacional que seus similares reportados na literatura. Por tanto, consideramos que os resultados alcançados são satisfatórios.

## Referências

- Cormen, T. H., Leiserson, C. E. & Rivest, R. L., 2001. *Introduction to algorithms*. 2nd ed.
- Fornari, G., Monné Alfaro, G. & Sanchez Domingues, D., 2013. *Análises de disponibilidade em sistemas de usinas hidrelétricas utilizando matrizes de dependência*.
- Institution, B. S., 2008. *Asset management. Specification for optimized management of physical assets*. s.l.:The Institute of Asset Management.
- Joel Sanchez Dominguez, D. F. D. S. D., 2013. *A Comparative Study of Two Novel Reliability/Availability Calculation Methods*. s.l., International Youth Conference on Energy.
- Ministério de Minas e Energia, 2013. *Anuario estatístico de energia elétrica*. s.l.:s.n.
- Moreira, R., Frias, D. & Sanchez Dominguez, D., 2013. *Metodologia para Avaliação da Disponibilidade de Usinas Hidrelétricas para Apoio na Gestão de Ativos Físicos*. Rio de Janeiro, VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica.
- Rosa, M. A., da Silva, A. M. & Miranda, V., 2012. Multi-agent system applied to reliability assessment of power system. *Electrical Power and Energy System*.
- Sanchez Dominguez, D., Frias, D., Torres Valle, A. & Perdomo Ojeda, M., 2012. *Matrizes de Dependências e Sistemas Multiagentes no Monitoramento de Confiabilidade e Disponibilidade de Usinas Hidroelétricas*. s.l., XIV Congresso Brasileiro de Energia.
- Sanchez Dominguez, D. & Oliva, J., 2011. *Segurança e Confiabilidade em Sistemas Industriais – Princípios Básicos*. Salvador: JM Editora Ltda..
- Torres Valle, A. & Perdomo Ojeda, M., 2010. Control de configuraciones peligrosas a través de matrices de dependencias en centrales nucleares.. Volume 47.
- Volkanovsky, A., Cepin, M. & Mavko, B., 2009. Application of fault tree analysis for assessment of power system reliability.
- Wang, H., 2002. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. Volume 139.
- Wang, W. L. J., 2004. Reliability Block Diagram Simulation Techniques Applied to the IEEE Std. 493 Standard Network. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(3), pp. 887-895.