**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Davi M. F. Boratto**

**Eduardo M. Loureiro**

**Tópicos Especiais em Análises de Redes Elétricas - Confiabilidade de Sistemas**

**Trabalho 1: Confiabilidade da Geração**

Juiz de Fora

2023

# INTRODUÇÃO

A estimação dos índices de confiabilidade em sistemas de geração de energia elétrica é essencial para avaliar o desempenho e identificar áreas de possível aprimoramento desses sistemas.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo obter os índices anuais de confiabilidade de um sistema de energia elétrica, com foco no sistema IEEE-RTS (Sistema de Teste de Confiabilidade de Energia Elétrica da IEEE). Para isso, serão empregados dois métodos: a Enumeração Exaustiva e a Simulação de Monte Carlo Não-Sequencial.

A Enumeração Exaustiva é um método de cálculo que envolve a avaliação determinística de todas as combinações possíveis de eventos de falhas no sistema, o que permite uma análise precisa, porém intensiva em termos computacionais.

Já o Método de Monte Carlo Não-Sequencial (MMCNS) é uma técnica baseada em simulações estocásticas que, embora menos precisa, é bastante eficiente em termos de processamento de grandes conjuntos de dados.

Por fim, os resultados obtidos por meio desses dois métodos serão apresentados e comparados, em termos de suas estimativas dos índices de confiabilidade.

# PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

1. Arquivo ler\_curva.ipynb

Lê os dados da planilha fornecida com os dados da curva de carga (arquivo curva de carga.xlsx), interpreta e gera uma nova planilha com os patamares de carga, suas probabilidades e probabilidades acumuladas;

1. Arquivo Enum\_Exaustiva.ipynb

A partir dos dados de carga (gerados pelo arquivo ler\_curva.ipynb) e dos dados de geração fornecidos (arquivo Gerac.xlsx), estima os índices de confiabilidade através do método da Enumeração Exaustiva, por meio da construção da COPT - *Capacity Outage Probability Table*.

1. Arquivo Simul\_Monte\_Carlo.ipynb

A partir dos dados de carga (gerados pelo arquivo ler\_curva.ipynb) e dos dados de geração fornecidos (arquivo Gerac.xlsx), estima os índices de confiabilidade através do método da Simulação de Monte Carlo Não-Sequencial.

# SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas. Inicialmente, os índices foram obtidos por meio da enumeração exaustiva, a partir da construção da tabela COPT para cada nível de carga anual. É importante destacar que foram consideradas todas as combinações de eventos de falhas possíveis, ou seja, não foi adotado um critério máximo N-2. Os resultados obtidos são vistos na Tabela 1. O tempo de simulação neste caso foi de aproximadamente 90,3 segundos.

|  |  |
| --- | --- |
|  | **Valor** |
| **LOLP** | 0,023381376 |
| **EPNS (MW)** | 3,636701732 |
| **LOLE (h/ano)** | 204,8208542 |
| **EENS (MWh/ano)** | 31857,50717 |
| **EIR** | 0,999984576 |

Tabela 1 – Índices encontrados pelo método da Enumeração Exaustiva

Na Tabela 2, é visto um recorte da COPT para o caso em que a carga está em 100 %, ou seja, 2850 MW. Caso se queira ver todas as mais de 3 mil linhas desta tabela, o resultado completo é visto ao final do arquivo Enum\_Exaustiva.ipynb. Nesta tabela, nota-se que os valores das probabilidades individuais de cada cenário são bem pequenos. Inclusive, o caso em que não há nenhum gerador em estado de falha – cuja potência indisponível é 0 – possui uma probabilidade de cerca de apenas 0,236 ou 23,6 %. Isto acontece devido ao grande número de unidades geradoras presentes neste sistema, bem como pelas suas respectivas taxas de falha, que são mais elevadas do que as taxas de geradores reais.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Pot. Indisponível [MW]** | **Probabilidade (p)** | **Perda de Carga (X) [MW]** | **X \* p  [MW]** |
| 0 | 0,236395 | 0 | 0 |
| 12 | 0,024122 | 0 | 0 |
| 20 | 0,105065 | 0 | 0 |
| 24 | 0,000985 | 0 | 0 |
| 32 | 0,010721 | 0 | 0 |
| ... | ... | ... | ... |
| 3373 | 1,07E-44 | 2818 | 3,00E-41 |
| 3381 | 2,90E-44 | 2826 | 8,20E-41 |
| 3385 | 4,35E-47 | 2830 | 1,23E-43 |
| 3393 | 2,96E-46 | 2838 | 8,40E-43 |
| 3405 | 1,21E-48 | 2850 | 3,44E-45 |

Tabela 2 – Tabela COPT para o caso de 100% de carga

A seguir, foram realizadas as simulações pelo método de Monte Carlo. Foram utilizados como parâmetros: tolerância e 0.005 e números mínimo e máximo de simulações de 100 e 1.107, respectivamente. Os resultados obtidos são vistos na Tabela 3. O tempo de simulação neste caso foi de aproximadamente 42,4 segundos.

|  |  |
| --- | --- |
|  | **Valor** |
| **LOLP** | 0,023253502 |
| **EPNS (MW)** | 3,606679832 |
| **LOLE (h/ano)** | 203,7006815 |
| **EENS (MWh/ano)** | 31594,51533 |
| **EIR** | 0,999984704 |

Tabela 3 – Índices encontrados pelo método da Simulação de Monte Carlo Não-Sequencial

Após realizar as simulações por meio dos dois métodos, os resultados foram exportados para planilhas no arquivo Resultados.xlsx, no qual também foi possível calcular os erros da estimação de cada índice. Esses erros são expressos, em valores percentuais, na Tabela 4.

|  |  |
| --- | --- |
| **Erro por Índice (%)** | |
| **LOLP** | 0,547% |
| **EPNS (MW)** | 0,826% |
| **LOLE (h/ano)** | 0,547% |
| **EENS (MWh/ano)** | 0,826% |
| **EIR** | 0,000% |

Tabela 4 – Erros entre os dois métodos

Como se pode observar, os valores obtidos através dos dois métodos foram bem próximos entre si, sendo todos os erros menores do que 1%. Desta forma é possível afirmar que o MMCNS possui resposta suficientemente próxima à resposta obtida pela enumeração exaustiva.

O erro da LOLP foi menor do que o da EPNS. Isto pode ser explicado pelo fato de que a LOLP foi o critério de convergência utilizado nas simulações de Monte Carlo realizadas.

Comparando o tempo computacional, nota-se que as simulações de MMCNS chegaram à convergência de forma muito mais rápida que usando a metodologia de enumeração exaustiva. O maior motivo é pelo fato de que ao realizar a enumeração exaustiva, a montagem da COPT é realizada com todas as possibilidades de faltas nas usinas, ao passo de que nas simulações de MMCNS essas possibilidades são feitas de maneira aleatória e a quantidade de iterações necessária para a convergência do método depende dos critérios escolhidos para convergência.

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho buscou-se comparar o Método de Monte Carlo Não Sequencial e o Método da Enumeração Exaustiva aplicados para o calculo de confiabilidade do sistema IEEE-RTS.

Foi observado que o MMCNS obteve um desempenho superior quanto a tempo de execução e um resultado muito próximo ao encontrado na enumeração exaustiva.

Apesar do método da enumeração exaustiva dar os valores dos indicies de confiabilidade com exatidão, o tempo de execução dessa metodologia aumenta exponencialmente ao se acrescentar usinas e unidades geradoras, inviabilizando o uso deste método para estudo de sistemas de potência maiores do que o estudado.

Um artificio utilizado para diminuir o tempo computacional deste método foi agrupar usinas com unidades geradoras de mesma potência e probabilidade de falha. Isso pode ser feito uma vez que, neste estudo, considerou-se um sistema de barra única. Com isso, é possível diminuir o esforço computacional. Ainda assim, não se viabiliza o uso do método, visto que o uso do MMCNS obtém resultados muito próximos e com menor esforço computacional, a depender dos critérios de convergência definidos.