

# ESTUDO DE CONFIABILIDADE PARA UM SISTEMA DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA INSERÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO

G. M. Lazari, L. H. Medeiros, N. D. Barth, R. Biazzi, M. Sperandio

Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência

Universidade Federal de Santa Maria

Santa Maria, Brasil

gustavodelazari@gmail.com

**Resumo**— Esse estudo apresenta uma análise de confiabilidade para um sistema de potência de geração e transmissão de energia elétrica. Serão analisadas as fragilidades que o sistema apresenta quando simuladas todas as contingências para o nível hierárquico NH2 através do critério N-2 utilizando o software ANAREDE. Assim, serão observados os incrementos de confiabilidade decorrentes da inserção de um parque eólico ao sistema. Serão comparados os cenários em que o parque eólico opere como uma fonte variável e como uma fonte não intermitente de energia elétrica.

**Palavras-chave**— Cadeias de Markov, Confiabilidade Composta, COPT, Diagrama de Cortes Mínimos, Geração Eólica.

## I. INTRODUÇÃO

Sistemas de potência utilizam-se da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para suprir as necessidades de seus consumidores. Para isso, é interessante que esse sistema opere a altos níveis de confiabilidade, garantindo assim, seu funcionamento contínuo.

A confiabilidade do sistema elétrico é a habilidade do mesmo em fornecer energia nos maiores níveis de eficiência, segurança e economia. Tradicionalmente, usam-se os critérios probabilísticos, através dos dados históricos de operação e reparo, para analisá-la.

O estudo de confiabilidade de um sistema de potência averigua quais equipamentos possuem maior possibilidade de falha. Assim, simulam-se as combinações de perdas dos equipamentos de geração e transmissão através das suas contingências compostas.

Entre os métodos utilizados para o estudo de confiabilidade de um sistema de potência está o método de enumeração de estados que consiste na escolha do nível hierárquico, definição dos critérios de contingências, criação do diagrama de cortes mínimos e cálculos dos seus parâmetros matemáticos.

O nível de confiabilidade de um sistema é mensurado através dos indicadores da tabela de probabilidade de interrupção de capacidade (COPT). Entre os indicadores mais importantes da COPT estão a *Loss Of Load Probability* (LOLP), *Loss Of Load Expectation* (LOLE), *Expected Power Not Supplied* (EPNS), *Expected Energy Not Supplied* (ENSS) e Severidade.

Nesse sentido, criam-se dois cenários que visam analisar o incremento de confiabilidade através da inserção de um novo ponto de geração. O primeiro cenário caracteriza-se pela inserção de um parque eólico nas suas condições reais, enquanto o segundo cenário acrescenta-se esse parque eólico funcionando como uma fonte não intermitente de energia.

## II. CONFIABILIDADE COMPOSTA

O estudo de confiabilidade para um sistema visa assegurar o máximo de eficiência, segurança e economia. Para isso, a confiabilidade baseia-se em métodos da estatística matemática e da teoria das probabilidades que possibilitam quantificar as chances que um determinado sistema ou componente possa vir a falhar [1].

No que se diz respeito ao presente artigo, a confiabilidade surge como modelo matemático apropriado para estimar a possibilidade de uma unidade geradora ou uma linha de transmissão não estar em funcionamento.

O objetivo dessa análise está em mensurar o impacto que as violações de potência possam acarretar em algum tipo de corte de carga para os consumidores. Esse estudo é de grande importância para a realização do planejamento da expansão de um sistema elétrico.

### A. Níveis Hierárquicos

A análise de confiabilidade pode abranger três níveis hierárquicos, conforme apresentado na fig. 1 [2].

1) *Nível Hierárquico 1 (NH1)*: Abrange o estudo de confiabilidade ligado a geração de energia.

2) *Nível Hierárquico 2 (NH2)*: Abrange o estudo de confiabilidade ligados a transmissão e geração de energia.

3) *Nível Hierárquico 3 (NH3)*: Abrange o estudo de confiabilidade ligados a distribuição, transmissão e geração de energia.

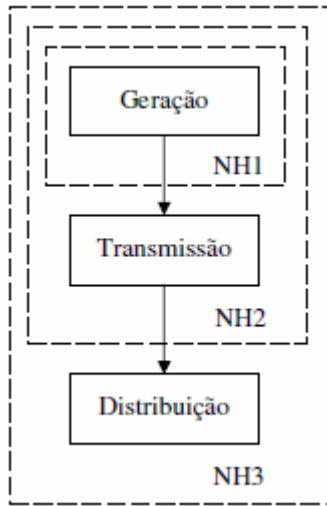


Fig. 1. Níveis hierárquicos.

### B. Método de Enumeração de Estados

O método de enumeração de estados é uma análise determinística realizada através da simulação de contingências. Entre os critérios usuais estão [2]:

1) *Critério N-1*: Verifica se o sistema é capaz de suportar as contingências simples em regime permanente sem que ocorra nenhum corte de carga.

2) *Critério N-2*: Verifica se o sistema é capaz de suportar as contingências duplas em regime permanente sem que ocorra nenhum corte de carga.

### C. Diagrama de Cortes Mínimos

Através dos métodos de enumeração de estados é possível criar o diagrama de cortes mínimos para o sistema. O diagrama de cortes mínimos pode apresentar os seus componentes em série ou paralelo. Os componentes em série são aqueles que indicam as contingências simples, fundamentais para o funcionamento do sistema. Já os componentes em paralelo são aqueles que indicam as contingências compostas, onde o corte de carga só acontece quando ambos equipamentos deixarem de funcionar.

### D. Cálculo dos Parâmetros de Confiabilidade

Para analisar a modelagem de confiabilidade que envolve as taxas de disponibilidade ou indisponibilidade de determinado componente do sistema elétrico usam-se os métodos das Cadeias de Markov e da tabela de probabilidade de interrupção de capacidade, a COPT.

O método das Cadeias de Markov determina a probabilidade do sistema estar em cada estado verificando-se os seus estados de transições [3].

Já a tabela COPT relaciona a magnitude dos estados de capacidade com sua a probabilidade de ocorrência. Entre os indicadores da COPT estão a LOLP, LOLE, EPNS, EENS e Severidade [4].

#### 1) LOLP

A *Loss Of Load Probability* (probabilidade de perda de carga) é o indicador que realiza o somatório das probabilidades ( $p$ ) dos estados que a capacidade do sistema ( $G$ ) é menor do que a carga ( $L_{m\acute{a}x}$ ). Para valores de geração maior que a demanda, a probabilidade de perda de carga é nula. A equação (1) apresenta o cálculo da LOLP, onde  $p_i$  representa a probabilidade do estado estar em operação.

$$LOLP = \sum p_i (L_{m\acute{a}x} > G) \quad (1)$$

#### 2) LOLE

A *Loss Of Load Expectation* (expectativa de perda de carga) é o somatório das probabilidades de perda de cargas calculadas para um determinado período em que a carga permanece nesse estado. A equação (2) apresenta essa relação, sendo  $t_i$  o valor correspondente ao tempo.

$$LOLE = \sum t_i * p_i (L_{m\acute{a}x} > G) \text{ dias/ano} \quad (2)$$

#### 3) EPNS

A *Expected Power Not Supplied* (expectativa de potência não suprida) calcula a potência não entregue multiplicada pela sua probabilidade. A equação (3) apresenta sua característica, onde  $C$  é o valor da demanda do sistema.

$$EPNS = \sum p_i * (L_{m\acute{a}x} - C) \text{ MW} \quad (3)$$

#### 4) EENS

A *Expected Energy Not Supplied* (expectativa de energia não suprida) é a potência não atendida em um determinado tempo (considera-se o ano comercial de 8760 horas). A equação (4) relaciona a EENS através dos valores EPNS.

$$EENS = EPNS * 8760 \text{ MWh/ano} \quad (4)$$

#### 5) Severidade

A severidade relaciona a energia não suprida (MWh) pela ponta (MW) do sistema analisado. Esse cálculo representa uma perturbação imaginária que converte o acúmulo de energia não suprida se toda a carga do sistema fosse afetada. A equação (5) apresenta o cálculo da Severidade.

$$\text{Severidade} = (EENS / \text{Demanda}) * 60 \text{ (Sis.min)} \quad (5)$$

Dessa forma, classifica-se o nível de severidade do sistema pelo intervalo de valores correspondentes ao grau que interpreta os níveis de condições operativas para cada situação [5]. A tabela I apresenta os valores e suas definições.

TABELA I. SEVERIDADE DO SISTEMA

Classificação	Valor	Nível
Grau 0	$S < 1$	Favorável
Grau 1	$1 \leq S < 10$	Satisfatório
Grau 2	$10 \leq S < 100$	Limítrofe
Grau 3	$100 \leq S < 1000$	Grave
Grau 4	$1000 \leq S$	Muito grave

E. Incremento de Confiabilidade

O incremento de confiabilidade para esse artigo trata-se de medidas corretivas ao sistema para que não ocorram cortes de cargas. Para esse estudo considera-se a adição de um parque eólico respeitando os critérios de imprevisibilidade de geração (causada pelas diferentes velocidades de vento) e para um caso de não intermitência de geração (100% da capacidade nominal).

III. ESTUDO DE CASO

Este artigo apresenta um estudo de caso para analisar a confiabilidade de um sistema elétrico de geração e transmissão de energia elétrica através da adição de um parque eólico. O sistema de potência é composto por duas usinas de geração de 200 MW e 120 MW que alimentam duas cargas de 100 MW e 150 MW através de 10 linhas de transmissão com capacidades individuais de 200 MVA. A fig. 2 apresenta a distribuição dos componentes do sistema.

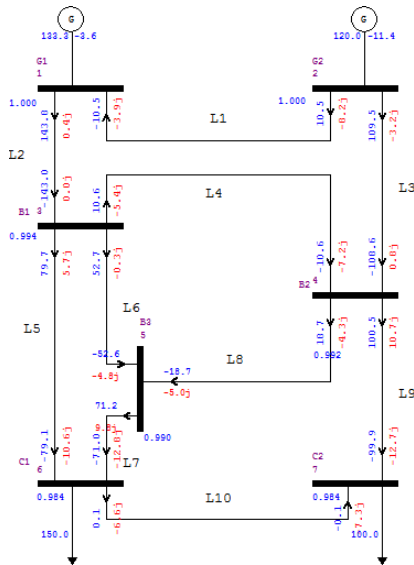


Fig. 2. Caso base.

As características de confiabilidade do sistema são especificadas na tabela II.

TABELA II. CONFIABILIDADE DO SISTEMA

Componente	Confiabilidade
LT1	0,9886
LT2	0,9967
LT3	0,9935
LT4	0,9881
LT5	0,9927
LT6	0,9943
LT7	0,9959
LT8	0,9910
LT9	0,9954
LT10	0,9867
G1 (4x50 MW)	0,99464
G2 (3x 40 MW)	0,99464

Para realizar o cálculo da confiabilidade do sistema e de seus parâmetros, é necessário obter o diagrama de cortes mínimos do mesmo. Dessa forma, simulam-se as contingências de primeira e segunda ordem para observar quais cenários geram algum tipo de corte de carga.

As contingências de primeira ordem da geração são aqueles responsáveis pela perda de uma unidade geradora de pelo menos um dos geradores. Já os cortes de primeira ordem da transmissão são aqueles responsáveis pela perda de uma linha de transmissão do sistema.

As contingências de segunda ordem da geração (ou compostas) são aquelas responsáveis pela perda de duas unidades geradoras, podendo está ocorrer simultaneamente nas duas usinas de geração. Já as contingências de segunda ordem da transmissão são aquelas responsáveis pela perda de duas linhas de transmissão do sistema.

Além dos casos prévios, são consideradas contingências compostas a perda de uma unidade geradora com a perda de uma linha de transmissão.

Depois de levantadas todas as combinações possíveis de contingências, simulam-se no software ANAREDE quais combinações geram cortes de cargas. Definida as contingências que provocam perda de carga, cria-se o diagrama de cortes mínimos e calcula-se a confiabilidade e seus índices LOLP, LOLE, EPNS, EENS e Severidade.

Por fim, realizam-se estudos de incremento de confiabilidade do sistema através da análise de 2 cenários de expansão de geração.

a) *Cenário 1: Inserção de um parque eólico:* Nesse cenário, insere-se um parque eólico na barra 3 do sistema base como tentativa de melhorar os índices de confiabilidade. Sabe-se que a potência (P) de um aerogerador varia conforme a velocidade do vento (em m/s). Para esse estudo, consideram-se três patamares de geração, de acordo com (6).

$$\begin{aligned}
 v < 7; P &= 20\% \\
 7 \leq v < 10; P &= 60\% \\
 v \geq 10; P &= 100\%
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Assim, através de 8760 medidas de vento realizados de hora em hora para um intervalo de tempo de 1 ano para uma região pré-estabelecida, definiu-se um parque eólico que apresenta níveis de potências individuais e máximas conforme a tabela III.

TABELA III. PARQUE EÓLICO

Dados dos Aerogeradores	
Índice	Valor
Confiabilidade	0,990627
Número de Unidades	23
Potência Unitária	3,5 MW
Potência Máxima	80,5 MW
Dados de Ventos	
Patamar 1	2821 (h/ano)
Patamar 2	2036 (h/ano)
Patamar 3	3903 (h/ano)

b) *Cenário 2: Inserção de uma geração não intermitente de potência:* Para esse cenário considera-se na barra 3 do sistema base um parque eólico com geração não intermitente de energia com uma confiabilidade de 0,98996.

#### IV. RESULTADOS

Através do software ANAREDE encontra-se os cortes de cargas que são causados pelas contingências de primeira e segunda ordem do sistema base. Dessa forma, obtém-se o diagrama de cortes mínimos que possibilitam o cálculo dos parâmetros de confiabilidade do sistema. A fig. 3 apresenta o diagrama de cortes mínimos para o caso base, já a tabela IV apresenta os cortes de carga.

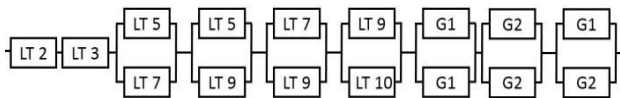


Fig. 3. Diagrama de cortes mínimos para o caso base.

TABELA IV. CORTES DE CARGA

Contingência	Potência não suprida	Ordem
Linha de Transmissão 2	55,3 MW	1
Linha de Transmissão 3	53,5 MW	1
Linhas de Transmissão 5 e 7	60,6 MW	2
Linhas de Transmissão 5 e 9	60,5 MW	2
Linhas de Transmissão 7 e 9	63,9 MW	2
Linhas de Transmissão 9 e 10	100 MW	2
Unidades Geradoras 1G1 e 1G1	30 MW	2
Unidades Geradoras 1G1 e 1G2	20 MW	2
Unidades Geradoras 1G2 e 1G2	10 MW	2

Através das probabilidades de cada cenário ocorrer somando-se ao corte de carga decorrente do mesmo é possível calcular os parâmetros da confiabilidade para o caso base conforme a tabela V.

TABELA V. CASO BASE

Parâmetros de Confiabilidade	
Índice	Valor
LOLP	0,01053
LOLE	3,8437 dias/ano
EPNS	0,55598 MW
EENS	4870,40 MWh/ano
Severidade	1168,89 Sist.min
Confiabilidade	0,98949

Para promover um incremento de confiabilidade do sistema e uma tentativa de atendimento dos possíveis cortes de carga são estudados dois cenários de inserção de geração na barra 3.

#### A. *Cenário 1: Inserção de uma parque eólico.*

Com a inserção do parque eólico na barra 3 do sistema realiza-se um novo estudo de fluxo de potência no software ANAREDE que relaciona a potência não suprida da tabela IV com a probabilidade de geração do parque eólico de acordo com seus patamares de vento. O diagrama de blocos para o cenário 1 pode ser visto na fig. 4 enquanto os parâmetros de confiabilidade para o cenário 1 são apresentados na tabela VI.

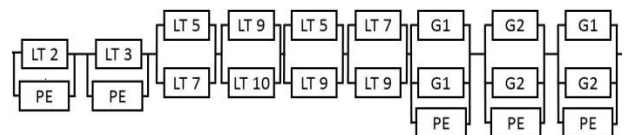


Fig. 4. Diagrama de cortes – cenário 1.

TABELA VI. CENÁRIO 1

Parâmetros de Confiabilidade	
Índice	Valor
LOLP	0,00565
LOLE	2,0652 dias/ano
EPNS	0,08619MW
EENS	755,09 MWh/ano
Severidade	181,22 Sist.min
Confiabilidade	0,99435

### B. Cenário 2:

Com a inserção de uma fonte não intermitente (NI) de energia na barra 3 do sistema, considerando as mesmas características de potência máxima e confiabilidade do parque eólico encontra-se o diagrama de cortes mínimos e os parâmetros de confiabilidade como podem ser vistos na fig. 5 e na tabela VII, respectivamente.

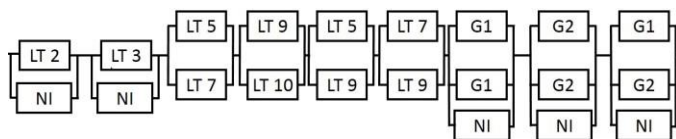


Fig. 5. Diagrama de Cortes – cenário 2.

TABELA VII. CENÁRIO 2

Parâmetros de Confiabilidade	
Índice	Valor
LOLP	0,00009
LOLE	1,2575 horas/ano
EPNS	0,01118 MW
EENS	97,94 MWh/ano
Severidade	23,506 Sist.min
Confiabilidade	0,999856

Os cenários 1 e 2 quando comparados ao caso base indicaram um aumento de confiabilidade de 0,49% e 1,05% respectivamente. Já a severidade apresentou a passagem do cenário 1 do grau 4 para o grau 3, e do cenário 2 do grau 4 para o grau 2.

## V. CONCLUSÕES

As análises de contingência de um sistema elétrico são de grande importância para avaliar a confiabilidade do mesmo. Através do diagrama de cortes mínimos e das probabilidades de falha dos equipamentos é possível diagnosticar o déficit de potência que a falta de geração ou transmissão poderá acarretar ao sistema. Assim, esse artigo analisou a confiabilidade de um sistema através da inserção de novos pontos de geração, enfatizando a geração eólica.

Por intermédio do software ANAREDE foi possível simular os impactos que as contingências de primeira e segunda ordem causam em um sistema de potência. Para o caso estudado identificou-se uma fragilidade inicial na transmissão de energia elétrica nas linhas 2 e 3 por serem cortes de primeira ordem. Também, foram detectadas 7 contingências compostas envolvendo geração e transmissão de energia elétrica.

Esse estudo mostrou-se importante para identificar as fragilidades de um sistema de potência e para avaliar a confiabilidade do mesmo. Observou-se que a adição de um parque eólico, no cenário 1, ajudou razoavelmente na diminuição da severidade e no aumento da confiabilidade do sistema. Já no segundo cenário, obtiveram-se melhores resultados com a adição de uma fonte não intermitente de energia, por se tratar de uma geração que não depende da imprevisibilidade do vento. Também, notou-se que nem sempre o acréscimo de geração é a solução para possíveis cortes de carga. Muitas vezes o problema está na capacidade elétrica dos outros equipamentos da rede, como no presente artigo, ocorreu com as linhas de transmissão. Esse problema deve-se ao fato do sistema necessitar de mais de um caminho de transmissão para atender os seus consumidores.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INCT-GD e aos órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. de B. Camargo, "Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica," LTC/ELETRONBRAS/FEESC, 1981.
- [2] J. A. Dias, "Avaliação da Confiabilidade Composta Baseada em Simulação Monte Carlo com Representação da Geração Eólica," Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, 2008.
- [3] R. Billinton, Reliability Evaluation of Power Systems. Vol. 2, Plenum Press: New York, 1996.
- [4] S. Sulaeman, Evaluation of Wind Capacity Credit Using Discrete Convolution Considering the Mechanical Failure of Wind Turbines," Durham, UK. 7-10 Jul. 2014.
- [5] EPE – Empresa de Pesquisa Energética, "Estudos Associados Ao Plano Decenal De Energia PDE 2007/2016," Cap. 2, pág 15. Brasília: MME/EPE, 2007.