

UMA FERRAMENTA WEB GRÁFICA PARA MODELAGEM E ANÁLISE DA DEPENDABILIDADE EM SMART GRIDS

GISLIANY ALVES*, IVANOVITCH SILVA*, LUIZ AFFONSO GUEDES*

**Departamento de Engenharia de Computação e Automação, Instituto Metrópole Digital
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário, Lagoa Nova, CEP 59078-970
Natal, RN, Brasil*

Emails: gisliany.alves@gmail.com, ivan@imd.ufrn.br, affonso@dca.ufrn.br

Abstract— Smart Grids are already the next generation in energy distribution. They aim to guarantee an increase of reliability, safety, and quality in the whole electric supply process, from generation to consumption by the end-user. In order to do this, those networks gather information and communication elements, renewable energy sources and other equipment that raise the complexity of the system. Therefore, it is essential to analyze the fundamental aspects of the network dependability, preferably by using a predictive way to evaluate how reliable is that grid before its implementation. Taking into account those aspects, a graphical web tool for dependability analysis in Smart Grids is proposed in this paper. The application provides a drawing area for the user to trace the grid topology as a graph and to enter the basic information to perform the dependability analysis. The methodology applied to this analysis is based on the mathematical formalism of fault trees, hence, it is capable of returning the necessary rates for a quantitative study of reliability. The tool also prepares a tabular view of the resulting data or plots graphs and displays them to the user.

Keywords— Smart Grids, Dependability, Tool, Fault Tree, Reliability.

Resumo— Redes elétricas inteligentes já representam a próxima geração em tecnologia de distribuição de energia elétrica. Elas objetivam garantir uma maior confiabilidade, segurança e qualidade em todo o processo de fornecimento elétrico, partindo da geração até o consumo pelo usuário final. Para isso, essas redes agregam elementos de informação e comunicação, fontes de energia renováveis e outros equipamentos que aumentam a complexidade do sistema. Por essa razão, é imprescindível analisar os aspectos inerentes à dependabilidade da rede, preferencialmente de forma preditiva, para avaliar o quão confiável ela é antes de ser efetivamente implantada. Levando-se tais aspectos em consideração, é proposta uma ferramenta web gráfica para análise de dependabilidade em Redes Elétricas Inteligentes. A aplicação apresentada provê uma modelagem para que o usuário trace a topologia da rede elétrica como um grafo e adicione as informações básicas para realizar a análise da dependabilidade. A metodologia aplicada para essa análise baseia-se no formalismo matemático de árvores de falha, capaz de retornar os índices necessários para um estudo quantitativo da confiabilidade. A ferramenta, então, prepara uma visualização tabular dos dados resultantes ou sob a forma de gráficos e os exibe ao usuário.

Palavras-chave— Redes Inteligentes, Dependabilidade, Ferramenta, Árvore de Falhas, Confiabilidade.

1 Introdução

De acordo com Yu et al. (2011), as redes de energia elétrica tradicionais são massivamente conectadas e têm operações hierárquicas e centralizadas. Essa forma de organização dessas redes pode gerar perturbações entre regiões específicas, causando transtornos como *blackouts*. Além disso, o crescimento do consumo de energia eleva a preocupação com o fornecimento, a segurança e a degradação ambiental.

É nesse contexto que surgem as Redes Elétricas Inteligentes – *Smart Grids* (SGs). Essas redes agregam as modernas tecnologias de informação e comunicação ao sistema elétrico atual, a fim de aumentar sua capacidade de monitoramento, integridade e confiabilidade (Guimarães and Murillo, n.d.).

Como essas redes atingem altos graus de complexidade – devido à integração com elementos computacionais, fontes de energia renováveis e outros equipamentos –, uma análise de sua tolerância a falhas é imprescindível. Uma forma de se realizar esse estudo é através da análise de depen-

dabilidade que, segundo Avizienis et al. (2004), é “a capacidade de evitar as falhas de serviço que são mais frequentes e mais graves do que o aceitável” e envolve aspectos de confiabilidade, disponibilidade, segurança, integridade e manutenibilidade.

Nesse contexto, há a necessidade de se realizar análise quantitativa de dependabilidade em SGs de forma sistemática. Essa abordagem sistemática deve ser baseada em um método de modelagem de dependabilidade de sistemas com respectivo suporte de ferramentas computacionais. O método para modelagem sistemática de dependabilidade de SGs foi proposto em Marques (2015), que consiste basicamente de três fases: i) modelagem da SG como um grafo; ii) juntamente com um modelo de falhas, realizar o mapeamento desse grafo em uma representação em árvore de falhas e iii) cálculo dos índices quantitativos de dependabilidade a partir da árvore de falhas obtida na fase anterior.

O presente artigo se destina a apresentar uma ferramenta web gráfica que dá suporte à aplicação automatizada desse método. A ferramenta foi

concebida de forma modular e possui funcionalidade de edição gráfica da topologia da SG, geração da árvore de falhas associada e cálculo dos índices quantitativos de dependabilidade, como percentual de tempo de disponibilidade de serviço, elementos críticos e tempo médio entre falhas.

O restante deste artigo é organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os conceitos de dependabilidade, métricas e árvores de falhas. A Seção 3 explica resumidamente o método para análise de dependabilidade utilizada neste artigo. A Seção 4 apresenta a estrutura e funcionalidades da ferramenta proposta. A Seção 5 apresenta um estudo de caso para validar essas funcionalidades. Por fim, a Seção 6 traz as principais conclusões e direções para trabalhos futuros.

2 Dependabilidade e Árvores de Falha

A dependabilidade é um tema amplamente discutido na literatura. Avizienis et al. (2004) a define como a qualidade de um serviço ser entregue de tal modo que seja justificadamente confiável. A definição de dependabilidade adotada neste trabalho é a de que ela é a habilidade de um sistema evitar falhas nos seus serviços mais críticos.

2.1 Medidas Fundamentais

Confiabilidade: a confiabilidade $R(t)$ de um sistema no tempo t é definida como a probabilidade de que um defeito no sistema não ocorra no intervalo $[0, t)$. Tomando T como o tempo até ocorrer um defeito no sistema e $F(t)$ sua função distribuição acumulada, então

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

MTTF: outra métrica importante é o MTTF (*Mean Time To Failure*). Ele representa o tempo esperado de funcionamento até a ocorrência da primeira falha. Dessa forma, o MTTF é dado por:

$$MTTF = E(T) = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty R(t) dt \quad (2)$$

2.2 Medidas de Importância

Nos sistemas em geral, é factível que alguns componentes sejam mais importantes que outros em termos de confiabilidade. É nesse contexto que as medidas de importância são aplicadas. Elas ordenam ou agrupam componentes de acordo com sua importância.

Birnbaum: de acordo com Rausand and Arnljot (2004), a métrica de Birnbaum é definida como a importância da confiabilidade de um componente i no tempo t e é dada por:

$$I^B(i|t) = \frac{\partial R(t)}{\partial R_i(t)} \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

2.3 Árvores de Falha

Árvores de Falhas (FTs) são diagramas em que um estado indesejado do sistema (falha) é informado e é feita uma busca por condições ambientais ou operacionais que possam ter causado esse estado (Rausand and Arnljot, 2004).

A falha que se deseja investigar através da FT é chamada de evento topo. As causas imediatas do evento topo $A_1, A_2, \dots$ são relacionadas a ele por meio de uma porta lógica. O próximo passo é encontrar as potenciais causas de $A_1, A_2, \dots$ e criar novamente uma relação através de uma porta lógica. O processo é repetido até que se chegue ao mais baixo nível de eventos, chamados de eventos básicos (Rausand and Arnljot, 2004).

Atualmente, as FTs são uma ferramenta muito importante para análises de confiabilidade. Através da Análise de Árvore de Falhas – *Fault Tree Analysis* (FTA) – pode-se realizar uma avaliação qualitativa e quantitativa do sistema (Rausand and Arnljot, 2004). Na análise qualitativa, a FTA identifica problemas que podem levar a falhas durante o desenvolvimento do sistema ou, já no comissionamento, a técnica encontra as causas de um defeito. A análise quantitativa, por sua vez, ajuda a mensurar as métricas de confiabilidade e disponibilidade (Silva et al., 2012).

A avaliação quantitativa de uma FT, enfocada neste trabalho, consiste em calcular a probabilidade do evento topo, baseando-se nas probabilidades dos eventos básicos. Supondo n entradas ou eventos independentes, a ocorrência do evento i é descrita por sua função acumulada $F_i(t)$, de modo que as saídas são obtidas de maneira diferente dependendo da porta lógica que associa as entradas. A Figura 1 ilustra as saídas para três portas lógicas: *and*, *or* e *k-out-of-n*.

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(t)) \quad F(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad F(t) = \sum_{|i| \geq k} \left(\prod_{i \in I} F_i(t) \right) \left(\prod_{i \notin I} 1 - F_i(t) \right)$$

Figura 1 - $F(t)$ para as portas *and*, *or* e *k-out-of-n*.

3 Método para Análise de Dependabilidade de SGs

Nesta seção é apresentado resumidamente o método para análise quantitativa de dependabilidade de SGs, que foi proposto originalmente em Marques (2015). O método pode ser aplicado tanto na fase projeto, a fim de prever a robustez da infraestrutura de uma SmartGrid, quanto em fases de operação e expansão, como meio de auxílio à manutenibilidade.

A Figura 2 apresenta uma visão geral desse método. Primeiramente, são fornecidas a topologia da rede, os dados de falhas e reparações de seus elementos, as métricas de avaliação, a priorização das cargas e a condição de defeito da rede.

A partir da informação de priorização das cargas, é possível ter conhecimento de quais delas devem ser preferencialmente atendidas em casos de falhas das fontes da SG. Nessa etapa, para cada carga é gerada uma expressão booleana, que pode ser simplificada através de um algoritmo como o Quine-McCluskey. Feito isso, o evento topo de cada carga a partir das fontes pode ser encontrado. Ainda de acordo com Marques (2015), o próximo passo é encontrar todos os caminhos entre cada fonte e cada carga que são passíveis de falha. Supondo a existência de k cargas, recai-se sobre o *problema k-terminal*. Por fim, a condição de falha da rede define a expressão lógica resultante, que é transformada em uma Árvore de Falhas e pode ser processada por um software que realize a Análise de Árvores de Falhas. Nesse trabalho, o software SHARPE foi escolhido como calculador das métricas de dependabilidade.

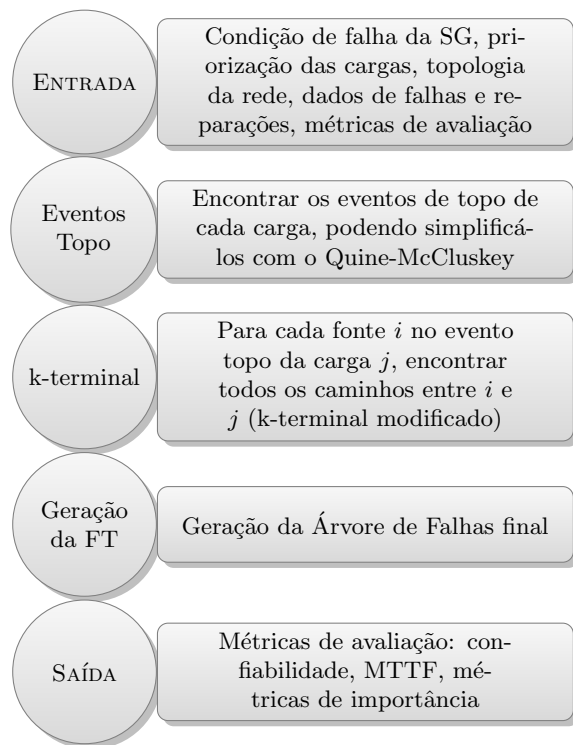


Figura 2 - Visão geral da metodologia.

4 Ferramenta Computacional Proposta

Nesta seção é apresentada a ferramenta web gráfica concebida para automatizar o método proposto em Marques (2015). Além disso, a ferramenta também busca prover uma interface gráfica amigável e de fácil utilização, tanto para auxiliar na entrada dos dados, quanto para oferecer uma visualização das saídas.

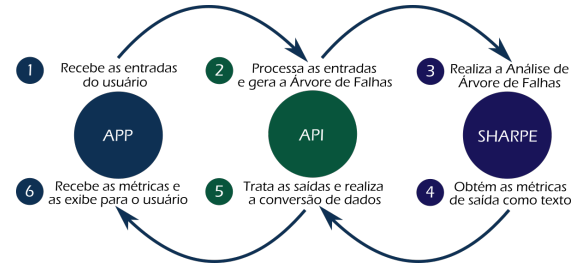


Figura 3 - Estrutura da ferramenta.

A ferramenta se estrutura em três partes principais: a Aplicação Cliente (APP), a API e o SHARPE. A Figura 3 ilustra a estrutura mencionada. Conforme se pode observar, o APP é a interface gráfica com o usuário que recebe os dados de entrada e os envia para a API. Essa última realiza o processamento dos dados recebidos aplicando a metodologia de análise já descrita. O resultado é, então, uma árvore de falhas representada através de uma codificação reconhecida pelo software SHARPE, que recebe essa estrutura e a analisa em termos das métricas solicitadas.

Na sequência, o SHARPE encontra as medidas de dependabilidade e as envia de volta à API sob a sua forma textual padrão de saída. A API trata o dado recebido, extraíndo as métricas de avaliação e convertendo-as para o tipo de dado adequado. Por fim, a API envia essas métricas para o APP, que as exibe para o usuário sob a forma tabular ou de gráficos.

4.1 APP

O APP é uma aplicação responsiva que realiza a interface com o usuário do sistema (Figura 4). Ele é responsável por receber os dados de entrada e apresentar as saídas retornadas pela API. Para implementá-lo foram utilizados o Angular 4 (um *framework* da Google) e algumas bibliotecas adicionais de auxílio, como o Cytoscape.js, utilizada para o desenho do grafo representativo da rede.

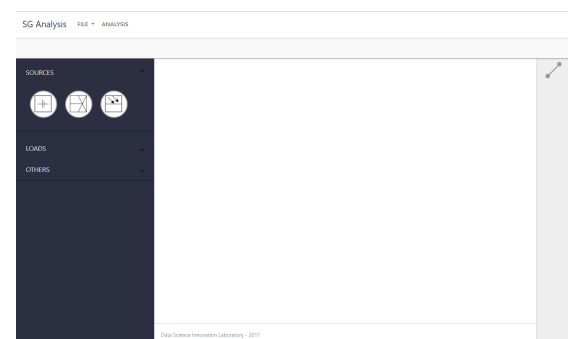


Figura 4 - Aplicação web.

A entrada de dados do APP são as mesmas da metodologia descrita. A aplicação também permite que o usuário informe as potências fornecidas pelas fontes e as consumidas pelas cargas, para

que se saiba quando há falhas no abastecimento caso uma fonte apresente defeito.

4.2 API

A API é a interface de programação que recebe as entradas vindas do APP, realiza um processamento sobre elas e as converte em uma Árvore de Falhas a ser enviada para o SHARPE. Esse processamento consiste na execução dos passos intermediários da metodologia de Marques (2015), em que é resolvida uma tabela verdade, seguida de uma otimização com o algoritmo de Quine-McCluskey e finalizada com uma abordagem sobre o problema *k-terminal* através de uma busca em profundidade. Além disso, também foi criada uma classe que faz a comunicação entre a API e o SHARPE. Ela gera a codificação da FT na linguagem que o solucionador (SHARPE) entende e realiza o tratamento dos dados retornados por ele.

Toda a API foi implementada em Flask, um *framework* cuja programação é feita em Python.

4.3 SHARPE

O SHARPE é uma ferramenta de modelagem hierárquica capaz de analisar modelos estocásticos em termos de confiabilidade, disponibilidade, performance, entre outros. Ele também apresenta duas formas de funcionamento: uma interface em linha de comando e uma interface gráfica de usuário (Duke University, 2017).

5 Resultados

Nesta seção é apresentado um estudo de caso para a validação da ferramenta proposta. Como ela se baseia na metodologia de Marques (2015), o estudo realizado é o mesmo que o feito pela autora.

Analisa-se, então, cenários envolvendo uma microrrede (*microgrid*), que consiste em uma rede *plug-and-play* de energia elétrica capaz de funcionar estando ou não conectada a uma rede elétrica inteligente tradicional (Farhangi, 2010).

5.1 Considerações

O diagrama da Figura 5 descreve o caso de estudo hipotético a ser analisado.

O sistema apresentado contém cinco cargas ($L8 - 19,2 \text{ kW}$, $L9 - 19,2 \text{ kW}$, $L10 - 8,8 \text{ kW}$, $L11 - 5,7 \text{ kW}$ e $L12 - 2,7 \text{ kW}$), cujas prioridades são determinadas pela ordem decrescente da potência que requerem para funcionar. Dessa forma, as prioridades são $L8 > L9 > L10 > L11 > L12$. Além disso, a microrrede tem cinco fontes de energia elétrica ($SB13 - 4 \text{ kW}$, $SB14 - 25 \text{ kW}$, $SP15 - 35 \text{ kW}$, $SP16 - 3 \text{ kW}$ e $SE17 - 5,5 \text{ kW}$) que geram uma potência que supre todas as cargas com sobra.

O objetivo do estudo de Marques (2015) é analisar a microrrede sob a ótica da dependabilidade através da sua metodologia. Considera-se que essa microrrede se desconecta da rede principal quando ocorrem falhas nos seguintes componentes: transformador de 220 kV/20 kV ($T0$), linha de transmissão de 4,9 km, transformador de 20 kV/400 V ($T1$), nas fontes de geração distribuída (solar, eólica e baterias) e nas junções $J3$, $J4$, $J5$, $J6$ e $J7$. Quando a microrrede se desconecta da rede principal (modo ilhado), considera-se que falhas ocorrem se a energia gerada não atende à demanda das cargas existentes.

Em relação aos componentes do sistema, considera-se que suas taxas de falha são exponenciais e tem valores descritos conforme a Tabela 1. Além disso, é importante saber que o tempo é medido em horas (Marques, 2015).

Tabela 1 - Taxas de falha dos dispositivos.

Componente	Taxa de falha	MTTF
Linha de 4,9 km	1.04e-4	1.09 anos
Transformador 220 kV	1.14e-6	100 anos
Transformador 20 kV	1.71e-6	67 anos
Fonte Fotovoltáica	7.61e-6	15 anos
Fonte Bateria	1.14e-5	10 anos
Fonte Eólica	1.43e-5	8 anos
Junções	1.14e-5	10 anos

5.2 Entrada de Dados

Primeiramente, informa-se a topologia da rede estudada conforme a Figura 5.

O próximo passo é indicar as taxas de falha conforme a Tabela 1 e as potências das fontes. Em seguida, é preciso informar a prioridade das cargas e a potência por elas consumida. Esses dados são configurados em caixas de diálogo associadas a cada componente da rede.

Também é necessário que seja informada a condição de falha. Neste estudo de caso, para cada cenário há condições de falha distintas:

- Cenário I (portas *or* e *and*)
 1. $L8 + L9$: a rede falha quando pelo menos uma das duas cargas não é alimentada
 2. $L8.L9$: a rede falha quando as duas cargas não são alimentadas
- Cenário II (porta *k-out-of-n*)
 1. Pelo menos uma das cargas falha
 2. Pelo menos duas das cargas falham
 3. Pelo menos três das cargas falham
 4. Pelo menos quatro das cargas falham
 5. Todas as cargas falham

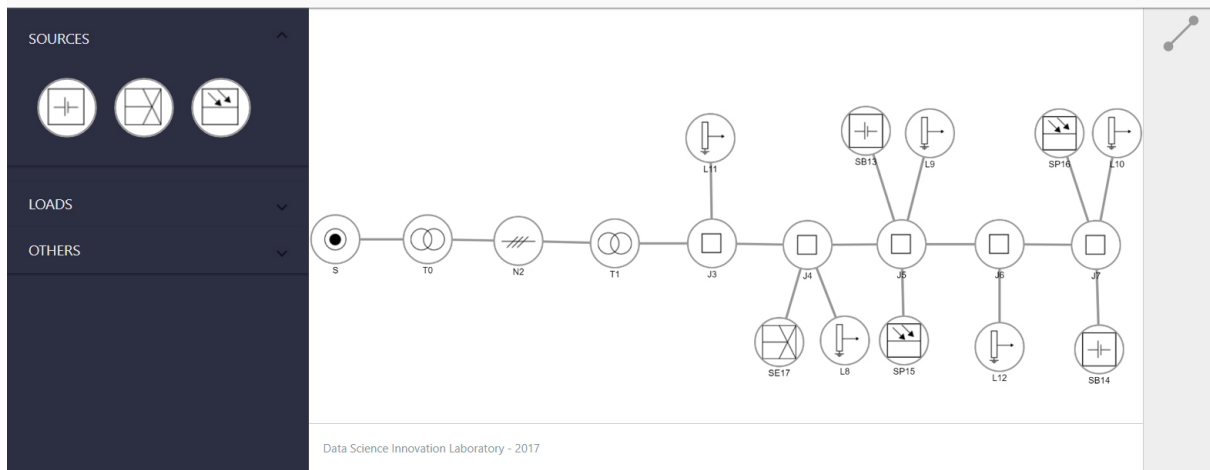


Figura 5 - Representação da topologia da microrrede.

Por fim, deve-se informar as métricas de avaliação. Neste estudo de caso serão avaliadas a confiabilidade e o MTTF para ambos os cenários e a medida de Birnbaum será aferida também para o segundo cenário. À exceção do MTTF, as outras duas medidas necessitam de parâmetros adicionais como tempo e o elemento envolvido.

5.3 Saídas da Ferramenta

5.3.1 Cenário I

Neste primeiro cenário são avaliadas a confiabilidade e o MTTF sobre as expressões dos eventos topo das cargas $L8$ e $L9$.

A primeira condição de defeito é $L8 + L9$, que significa que a rede falha quando uma dessas cargas falha. A segunda condição de defeito, por sua vez, é $L8.L9$, em que a rede falha quando as duas cargas falham simultaneamente. O resultado obtido para essas condições é exibido na Figura 6.

Conforme se pode observar, o resultado para $L8 + L9$ é mais pessimista que para $L8.L9$. Por exemplo, em $t = 20.000\text{ h}$, a confiabilidade no primeiro caso é aproximadamente 0,509, enquanto no segundo caso, ela atinge cerca de 0,711. Ademais, para $L8 + L9$, o MTTF foi de 27.710,92 horas, que equivale a aproximadamente 3,16 anos. Já para $L8.L9$, o MTTF foi igual a 42.537,63 horas, que representam cerca de 4,86 anos.

Tabela 2 - MTTF para a porta $k\text{-out-of-}n$

k	MTTF (h)	Acréscimo sobre k=1
1	1,3276e+04	-
2	1,6170e+04	21,793 %
3	2,0363e+04	53,379 %
4	3,1416e+04	136,626 %
5	4,1774e+04	222,174 %

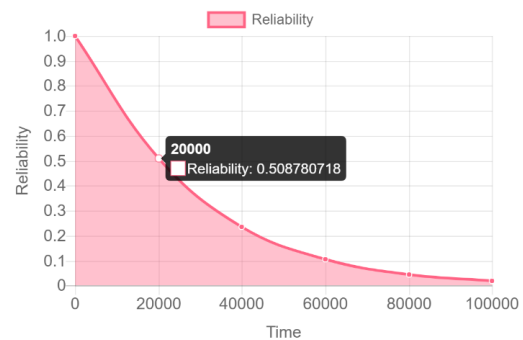
FUNDAMENTAL METRICS

MTTF

MTTF

27710.9207

RELIABILITY

(a) $L8 + L9$

FUNDAMENTAL METRICS

MTTF

MTTF

42537.6325

RELIABILITY

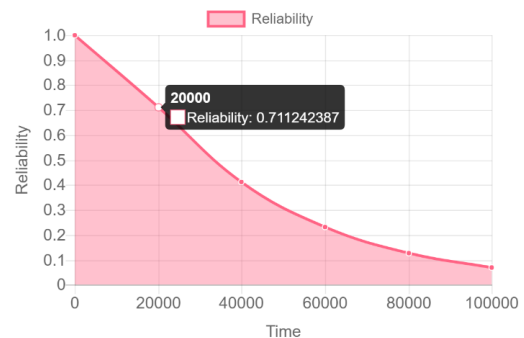
(b) $L8.L9$

Figura 6 - Resultados de confiabilidade e MTTF.

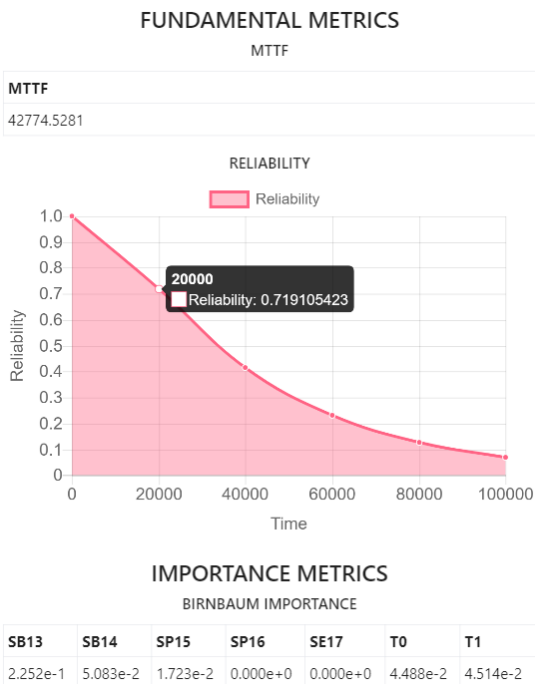
Tabela 3 - Avaliação das métricas de Birnbaum para os diferentes valores de k .

k	SB13	SB14	SP15	SP16	SE17	T0	T1
1	3,313e-01	3,313e-01	0,000e+0	0,000e+0	0,000e+0	4,006e-02	4,029e-02
2	4,131e-01	4,131e-01	0,000e+0	0,000e+0	0,000e+0	8,268e-02	8,315e-02
3	4,957e-01	1,685e-01	3,394e-02	3,394e-02	3,629e-02	7,632e-02	7,676e-02
4	6,267e-01	5,272e-02	2,663e-02	0,000e+0	1,046e-02	6,416e-02	6,452e-02
5	2,252e-01	5,083e-02	1,723e-02	0,000e+0	0,000e+0	4,488e-02	4,514e-02

5.3.2 Cenário II

Neste segundo cenário, cinco condições de defeito foram comparadas, utilizando-se a porta lógica k -out-of- n . Os resultados estão presentes na Tabela 2. Percebe-se que quanto maior k , maior é a confiabilidade ao longo do tempo, o MTTF cresce à medida em que k aumenta. Isso ocorre, porque é menos provável que um número maior de cargas deixem de ser atendidas simultaneamente. Para fins de verificação, a Figura 7 descreve a configuração com maior confiabilidade, quando $k = 5$.

Para avaliar a importância de alguns componentes, a métrica de Birnbaum foi aplicada sobre as fontes e os transformadores. A Tabela 3 mostra os valores de Birnbaum para $k = 1, 2, \dots, 5$. É perceptível que, para todos os valores de k , SB13 e SB14 apresentaram valores prevalentes em relação às demais fontes. Isso indica que essas duas fontes são de grande importância para o funcionamento da microrrede. No entanto, as fontes fotovoltaicas SP15 e SP16 e a fonte eólica SE17 tiveram os menores valores de Birnbaum em todos os casos, sendo de baixa relevância para o sistema.

Figura 7 - Resultados de confiabilidade e MTTF ($k = 5$).

6 Conclusões

As *Smart Grids* representam um grande salto no fornecimento de energia elétrica. Entretanto, o aumento da complexidade dessas redes requer estudos precisos, capazes de determinar sua robustez até antes de sua implantação. É por essas e outras necessidades que as avaliações de dependabilidade são imprescindíveis. Tendo isso em mente, Marques (2015) propõe uma análise quantitativa de SGs. Adotando-se, então, essa metodologia, este trabalho promoveu a criação de uma ferramenta que a automatiza. O sistema criado facilita a entrada dos dados pelo usuário, que é capaz de modelar grafos de topologia e fornecer os dados dos componentes. A ferramenta também melhora o processo de análise, provendo os resultados de avaliações sob a forma de tabelas e gráficos.

Em relação aos trabalhos futuros, pretende-se expandir a metodologia e ferramenta para suportar falhas em modo comum e em sequência, implementar novas métricas de avaliação assim como um solucionador próprio de árvores de falhas.

Referências

- Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B. and Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing, *IEEE transactions on dependable and secure computing* 1(1): 11–33.
- Duke University (2017). What is SHARPE?, <https://sharpe.pratt.duke.edu/node/1>.
- Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid, *IEEE power and energy magazine* 8(1).
- Guimarães, P. H. V. and Murillo (n.d.). Comunicação em redes elétricas inteligentes: Eficiência, confiabilidade, segurança e escalabilidade.
- Marques, D. B. (2015). *Metodologia para análise da dependabilidade de smart grids*, Mestrado em ciências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Rausand, M. and Arnljot, H. (2004). *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*, Vol. 396, 2 edn, John Wiley & Sons.

- Silva, I., Guedes, L. A., Portugal, P. and Vasques, F. (2012). Reliability and availability evaluation of wireless sensor networks for industrial applications, *Sensors* **12**(1): 806–838.
- Yu, X., Cecati, C., Dillon, T. and Simoes, M. G. (2011). The new frontier of smart grids, *IEEE Industrial Electronics Magazine* **5**(3): 49–63.