
CONTINUIDADE DE SERVIÇO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA: VALORES ESPERADOS, VALORES MÁXIMOS E DEFINIÇÃO DE PADRÕES

Relatório da Tarefa 1

Pedro Carvalho, Marcelino Ferreira,
João Santana, Célia de Jesus,
Alexandre Dias

1. Introdução	1
1.1 Análise de fiabilidade para estimação de valores esperados	2
1.2 Análise de risco para estabelecimento de padrões	2
2. Simulação de incidentes para análise de fiabilidade	4
3. Estimação de parâmetros para simulação de incidentes.....	7
4. Estabelecimento de padrões de continuidade de serviço	10
4.1 Obtenção de valores máximos para a frequência e duração das interrupções.....	10
4.2 Avaliação de risco e padrões de continuidade de serviço	15
4.3 Extensão da metodologia para a baixa tensão	19
5. Conclusão	21

1. Introdução

O IST/INESC-ID tem uma longa experiência de colaboração com o sector eléctrico, tendo nos últimos anos desenvolvido um portfólio de estudos abrangente sobre eficiência energética e qualidade de serviço técnica na distribuição de energia eléctrica, com enfoque particular sobre o estabelecimento de relações causais entre investimento nos activos e infraestruturas e correspondentes efeitos sobre o desempenho expectável do sistema de distribuição de energia.

Tendo em consideração que:

- A qualidade de serviço técnica, em particular a continuidade de serviço (CS), depende em grande medida das características da infraestrutura de distribuição de energia eléctrica, e
- O estabelecimento pela ERSE de padrões de CS terá impacto significativo no investimento sobre essa infraestrutura para a melhoria da CS, orientando o investimento para as zonas de rede cuja CS seja inferior ao padrão estabelecido,

é então importante garantir que são estabelecidos pela ERSE padrões de CS executáveis, no sentido em que tais padrões possam ser atingidos com investimento razoável sobre a infraestrutura de distribuição de energia.

Com o objectivo de contribuir para que a ERSE estabelecesse padrões de CS executáveis, o INESC-ID, em parceria com as principais concessionárias da rede de distribuição, estimou em 2017 os valores esperados dos indicadores individuais de CS relativos à duração e frequência das interrupções em cada ponto de entrega da rede em média tensão (MT).

Na posse de tais resultados e com conhecimento dos pressupostos com que foram obtidos, vimos agora apresentar as principais conclusões da análise realizada aos resultados apresentados em 2017 para os valores esperados dos indicadores individuais de CS, propondo uma metodologia para mapear esses resultados em valores máximos com um nível de confiança apropriado ao estabelecimento de padrões de CS.

Ao consolidar resultados obtidos para os valores esperados e ao estabelecer uma metodologia coerente e cientificamente sólida de mapear valores esperados em valores máximos, julgamos estar em condições de suportar tecnicamente uma alteração dos padrões de CS que oriente eficientemente o investimento para o cumprimento dos mesmos.

1.1 Análise de fiabilidade para estimação de valores esperados

A análise de fiabilidade da rede MT realizada em 2017 para cada concessionária assentou na utilização de ferramentas de simulação (DPlan). Porém a análise requereu muito mais do que a utilização destas ferramentas. Requereu uma caracterização detalhada da rede de distribuição de cada concessionária e uma parametrização dos processos de restabelecimento associados à reposição de serviço após defeitos em cada rede -- parametrização essa que é necessária à simulação subjacente à análise de fiabilidade.

Nos Capítulos 2 e 3 são descritos (i) os passos principais dos processos de restabelecimento simulados para cada evento de falha possível na rede, e (ii) os métodos utilizados para a parametrização desses processos com base nos dados de registos de incidentes. Uma parte significativa do esforço desenvolvido nos estudos de 2017 incidiu sobre a correcta caracterização dos activos de rede existentes e das topologias utilizadas na sua exploração, assim como sobre a tipificação das taxas de incidentes e tempos de restabelecimento para cada tipo de activo e situação operacional.

1.2 Análise de risco para estabelecimento de padrões

Os resultados obtidos na análise de fiabilidade de 2017 são resultados para *valores esperados* da continuidade de serviço por PdE. São valores esperados porque são estimados como funções de taxas médias de incidentes e tempos médios de restabelecimento.

Ora tanto o número anual de incidentes numa determinada linha/cabo como o tempo necessário para restabelecer o serviço depois de um incidente são variáveis aleatórias. Sendo variáveis aleatórias, a frequência e duração das interrupções de um dado PdE são função dessas variáveis e, por isso, funções de variável aleatória.

Sendo funções de variável aleatória, os resultados obtidos em 2017 representam os valores esperados dessas funções. Representando o espaço de possibilidades da frequência (ou duração) das interrupções num determinado PdE por uma função densidade de probabilidade (FDP), o valor esperado obtido em 2017 para cada PdE seria excedido com probabilidade 50%. Esse valor não serve por isso para estabelecer padrões de CS, uma vez que os padrões devem ser estabelecidos como

limites cujo cumprimento deve ser garantido com grande nível de confiança.

No Capítulo 4 são apresentadas as hipóteses subjacentes à determinação das propriedades da FDP necessárias para estabelecer valores máximos para a frequência e duração das interrupções com uma determinada garantia probabilística. Com base nessas hipóteses, é proposto (i) um método para mapear os valores esperados (conhecidos) para a CS nos correspondentes valores máximos, e (ii) um método para avaliar o risco de incumprimento por parte das concessionárias uma vez estabelecidos os padrões de CS. É finalmente apresentada uma forma de extrapolar para a BT os resultados obtidos para os valores esperados dos indicadores obtidos na MT.

2. Simulação de incidentes para análise de fiabilidade

Os indicadores de fiabilidade são calculados por simulação. Para cada falha possível de um componente (activos como uma linha, cabo, transformador, disjuntor, seccionador, etc.), é simulado um evento de falha, sendo depois analisada a interrupção causada e o correspondente processo de restabelecimento do serviço.

O texto seguinte é sobre a análise do processo de restabelecimento para um evento de falha de um único componente. Para o cálculo dos indicadores de fiabilidade, o simulador repete a análise (do processo) de restabelecimento para cada possível falha de cada um e todos os componentes da rede, e agrega os resultados de forma a calcular os indicadores de fiabilidade da rede pesando a contribuição de cada evento de acordo com a probabilidade desse evento (de falha). Esta probabilidade é estimada com base na *taxa de avarias* do componente em causa, também designada por *taxa de incidentes*.

Os indicadores de fiabilidade são calculados apenas para interrupções longas. Assim, a taxa de incidentes de um componente, λ , deve ser estimada excluindo os eventos que originam interrupções curtas, tais como defeitos *fugitivos*.

Em redes operadas radialmente, como as redes MT, espera-se que os defeitos sejam detectados por um disjuntor localizado a montante do defeito, o qual abrirá para eliminar o defeito, interrompendo o serviço a jusante da sua localização e permitindo assim que o resto da rede se mantenha em serviço. Se o disjuntor a montante estiver localizado na subestação, então toda a saída ficará fora de serviço. A figura seguinte ilustra a transição entre o estado normal e o estado de falha (de 0 para 1), transição que ocorre com uma frequência expressa pela taxa de incidentes, λ .

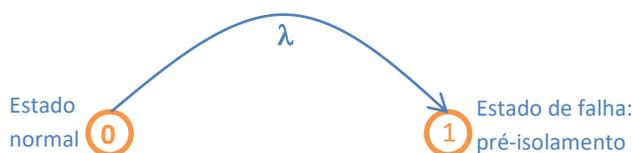


Figura 1. Defeito e transição para o estado de pré-isolamento.

O estado de falha (1) é designado por estado de *pré-isolamento*. A rede manter-se-á no estado de falha durante o período de isolamento do defeito (i.e., o tempo médio de isolamento, T_{isol}), uma vez que o disjuntor que abriu não pode ser fechado antes de isolar o componente defeituoso.

No entanto, durante o período de isolamento, T_{isol} , parte da sub-rede fora de serviço (ilha) pode ser reestabelecida por reconfiguração se houver saídas adjacentes e aparelhagem (*interruptores*) nessa sub-rede, que possa ser rapidamente manobrada para restabelecer parte da ilha antes de isolar o componente defeituoso (o tempo de operação dessa aparelhagem é designado por tempo médio de reconfiguração, T_{reconf}).

Se o restabelecimento de parte da sub-rede em ilha puder ser alcançado antes do isolamento, então o estado de pré-isolamento é dividido em vários sub-estados correspondentes ao sucessivo restabelecimento de partes dessa ilha. A figura seguinte ilustra a decomposição do estado de falha 1 em vários sub-estados de pré-isolamento.

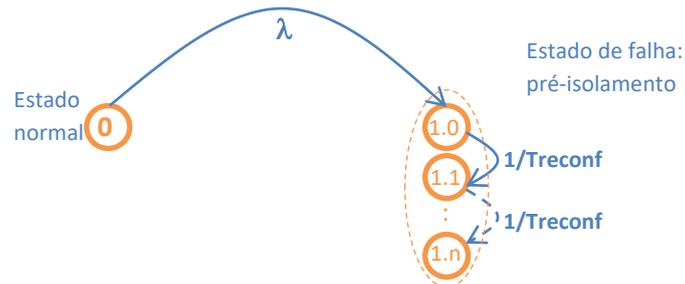


Figura 2. Transições entre subestados de pré-isolamento.

Após isolamento do componente defeituoso, o disjuntor a montante pode ser ligado, energizando a parte da saída a montante do componente isolado. Assume-se que o disjuntor a montante pode ser remotamente manobrado (através do SCADA) e, por isso, ligado em muito pouco tempo (em comparação ao T_{isol}). Como tal, o tempo necessário para resolver a interrupção *a montante* do defeito é considerado como sendo apenas o tempo médio de isolamento, T_{isol} . A figura seguinte mostra a transição para o estado de falha 2, o qual é designado como estado de pós-isolamento.

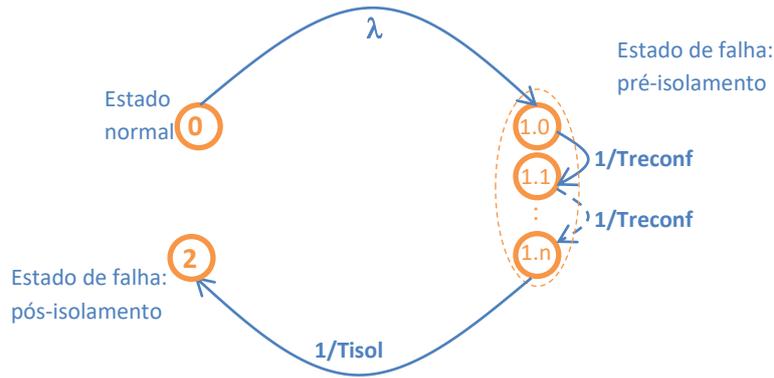


Figura 3. Transição para estado de pós-isolamento.

Findo o isolamento do componente defeituoso e consequente fecho do disjuntor a montante, o que resta da ilha fica restringido à sub-rede a jusante do componente isolado que não pôde ser energizada por reconfiguração da rede. Tal interrupção permanece até:

- i. O componente defeituoso ser reparado, no caso de não haver uma saída adjacente à sub-rede a jusante do componente isolado, ou
- ii. Ser ligado um interruptor entre a sub-rede a jusante e uma saída adjacente a essa sub-rede, no caso de haver uma saída adjacente.

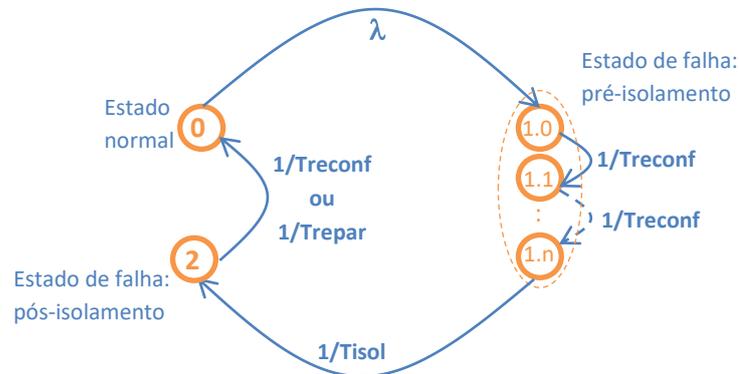


Figura 4. Reposição do serviço e transição para um estado normal de operação.

O interruptor a jusante normalmente aberto é seleccionado de entre os vários interruptores normalmente abertos possíveis, de forma a garantir a máxima capacidade de socorro e tempo mínimo de reconfiguração (T_{reconf}). Quando nenhuma das saídas adjacentes tem capacidade suficiente, assume-se que a potência restante ficará interrompida até que o componente defeituoso seja reparado, i.e., durante o período do tempo médio de reparação (T_{repar}). A figura acima ilustra a transição para um estado de restabelecimento completo, o qual não é o estado inicial em termos de topologia, mas é um estado normal do ponto de vista da interrupção.

3. Estimação de parâmetros para simulação de incidentes

Os dados disponíveis de melhor qualidade, e em maior quantidade, sobre incidentes nas redes MT residem no que vulgarmente se designa por *sistema de registo de incidentes*.

Tais registos indexam a um evento de falha um conjunto de dados sobre o componente (activo) incidentado, causas prováveis do incidente, etc., registando a sequência temporal das diferentes fases da reposição do serviço.

Geralmente, as fases de reposição de serviço registadas são duas e correspondem,

1. A primeira, ao tempo decorrido até à primeira reposição de serviço a alguns PdE, T_1 , e
2. A segunda, ao tempo decorrido entre a primeira reposição T_1 e a última reposição, T_u .

Tais registos temporais não têm uma correspondência biunívoca com os parâmetros temporais (T_{isol} , T_{reconf} , T_{repar}) descritos anteriormente como necessários à análise de fiabilidade.

A interpretação possível sobre a correspondência entre parâmetros e dados dos registos temporais difere consoante (i) o incidente tenha sido resolvido com ou sem recurso à reconfiguração da rede adjacente, e (ii) o tempo da primeira reposição, T_1 , seja ou não seja igual ao tempo da última reposição, T_u .

No que respeita à interpretação sobre tal correspondência, parece adequado dizer que:

Sendo os dados dos tempos da primeira e última reposição diferentes entre si, admite-se que os valores dos tempos da primeira reposição são uma boa estimativa do parâmetro *tempo de isolamento*. Neste caso,

1. Se a avaria tiver sido resolvida sem recurso, então o tempo entre a primeira e a última reposição é uma boa estimativa do *tempo de reparação*.
2. Se a avaria tiver sido resolvida com recurso, então o tempo entre a primeira e última reposição é uma boa estimativa do *tempo de reconfiguração*.

Sendo os tempos da primeira e última reposição iguais, entende-se que não foi possível repor parcialmente o serviço após o isolamento do defeito, e que, nesse caso,

3. Se a avaria tiver sido resolvida sem recurso, então os dados sobre o tempo $T_1 = T_u$ são uma boa estimativa da soma do *tempo de isolamento* com o *tempo de reparação*.
4. Se a avaria tiver sido resolvida com recurso, então os dados sobre o tempo $T_1 = T_u$ são uma boa estimativa da soma do *tempo de isolamento* com o *tempo de reconfiguração*.

As quatro situações descritas acima são ilustradas na figura seguinte.

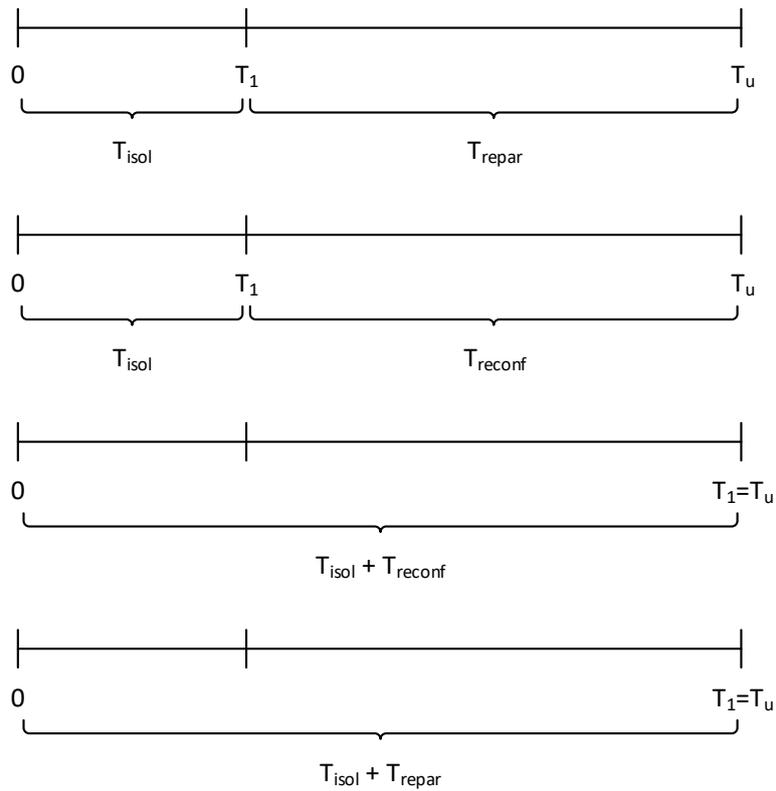


Figura 5. Ilustração da interpretação dos dados do registo de incidentes.

A interpretação apresentada anteriormente permite estabelecer cinco relações entre os parâmetros de fiabilidade a utilizar na simulação e os dados do registo de incidentes conhecidos, como a seguir se mostra:

$$T_u \neq T_1 \Rightarrow \begin{cases} t_{isol} \equiv T_1 \\ t_{repar} = T_u - T_1 \text{ (sem recurso)} \equiv T_2 \\ t_{reconf} = T_u - T_1 \text{ (com recurso)} \equiv T_3 \end{cases}$$

$$T_u = T_1 \Rightarrow \begin{cases} t_{isol} + t_{repar} = T_u = T_1 \text{ (sem recurso)} \equiv T_4 \\ t_{isol} + t_{reconf} = T_u = T_1 \text{ (com recurso)} \equiv T_5 \end{cases}$$

Estas relações podem ser expressas na forma matricial $Ax = b$, com

$$x = \begin{bmatrix} t_{isol} \\ t_{repar} \\ t_{reconf} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix}$$

O sistema $Ax = b$ é sobredeterminado e, por esse motivo, não tem solução algébrica.

A obtenção dos valores dos parâmetros x obriga a admitir erros ε na “observação” dos dados dos registos (i.e., resolver $Ax = b + \varepsilon$). A minimização dos erros de observação corresponde o que habitualmente se designa por *estimação* de parâmetros.

Os parâmetros x que minimizam o valor do erro quadrático podem obter-se resolvendo o problema seguinte:

$$\min_x \|Ax - b\|^2$$

Assim, os parâmetros necessários à análise de fiabilidade são obtidos dos dados de registos com recurso a estimação de parâmetros, pesando a variância e representatividade dos valores observados para cada relação representada.

4. Estabelecimento de padrões de continuidade de serviço

A análise de fiabilidade da rede por simulação dos eventos de falha com os parâmetros estimados para cada concessionária conduziu aos valores esperados da CS apresentados nos estudos de 2017. Esses resultados consistiram num valor esperado para a duração (total) das interrupções e num valor esperado para a frequência de interrupções por PdE em MT.

Representando o espaço de possibilidades para a duração ou frequência das interrupções em cada PdE por uma função densidade de probabilidade (FDP), o *valor esperado* encontrado nos estudos de 2017 para cada um desses PdE seria excedido com probabilidade de 50%¹, não servindo, por isso, como padrão de CS.

Para estabelecer padrões de CS, é necessário determinar os valores máximos da duração e frequência das interrupções em cada PdE com uma determinada garantia, e estabelecer padrões como majorantes desses máximos de forma a assegurar às concessionárias a possibilidade de cumprir esses padrões para a generalidade dos PdE. Os padrões de CS devem ser estabelecidos com base num nível de confiança pré-determinado, que dê uma garantia probabilística elevada de não ultrapassagem desses padrões.

4.1 Obtenção de valores máximos para a frequência e duração das interrupções

Assumindo que a taxa de incidentes da rede que alimenta um determinado PdE é invariante no tempo e, por isso, o valor esperado do número de interrupções é também invariante no tempo, então a distribuição probabilística da frequência de interrupções desse PdE é uma distribuição de Poisson, a qual é caracterizada pelo valor médio do número de eventos (incidentes), λ . A Fig. 6 mostra a probabilidade de ocorrer um dado número anual de interrupções num PdE exposto a um valor esperado de duas interrupções por ano.

¹ Note-se que, num período temporal suficientemente longo, um padrão igual ao valor esperado seria violado em metade dos anos desse período, o que demonstra que o valor esperado não deve ser utilizado como referência para o padrão de CS.

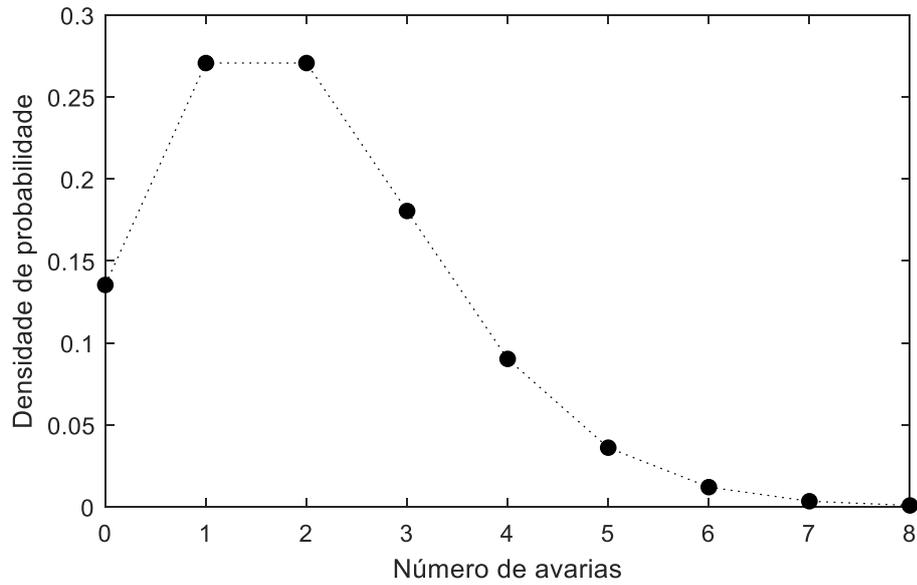


Figura 6. Densidade de probabilidade do número anual de interrupções para um PdE exposto a um valor esperado de duas interrupções por ano ($\lambda = 2 \text{ ano}^{-1}$).

Esta distribuição, embora tenha uma média igual ao valor esperado da frequência de interrupções, terá um máximo $N_{\text{máx}}$ (com um determinado nível de confiança) que excede essa média.

O valor relativo do desvio entre o valor máximo e o valor esperado, δ , será tanto maior quanto menor for o valor esperado da frequência de interrupções – essa propriedade deriva da distribuição de Poisson.

Na Fig. 7, ilustra-se a evolução do desvio relativo (entre máximo e média) com o valor esperado da frequência de interrupções, λ , para uma garantia de 99%. O desvio δ é calculado como a seguir se indica:

$$\delta^{99\%}(\lambda) = \frac{N_{\text{máx}}^{99\%} - \lambda}{\lambda} \Rightarrow N_{\text{máx}}^{99\%} = \lambda(1 + \delta^{99\%}).$$

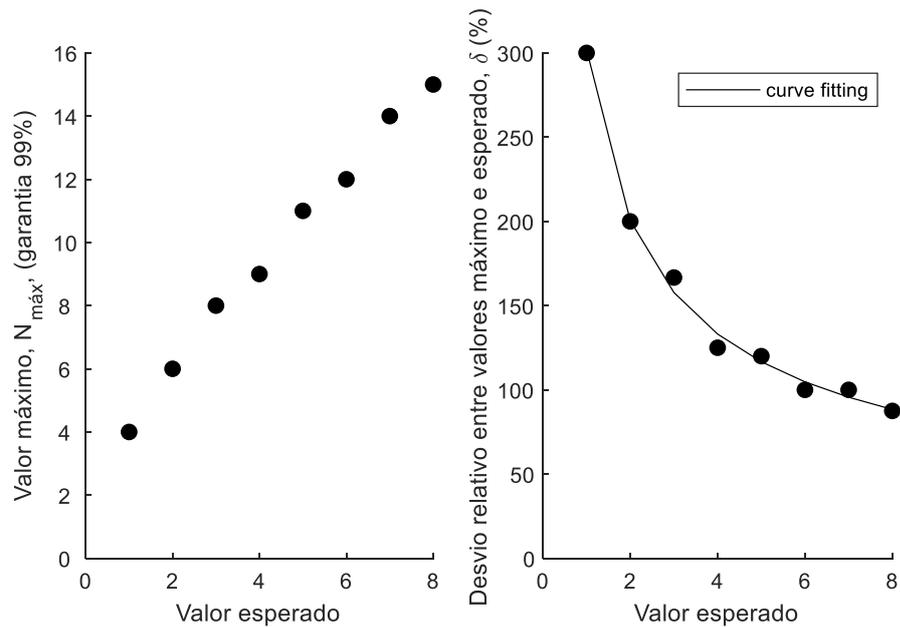


Figura 7. Valor máximo do número de interrupções em função do valor esperado da frequência de interrupções (esquerda) e desvio relativo entre o valor máximo e o valor esperado desse número como função do valor esperado da frequência de interrupções (direita). O valor máximo é calculado para um nível de confiança de 99%.

Na figura da direita, acima, é possível observar que:

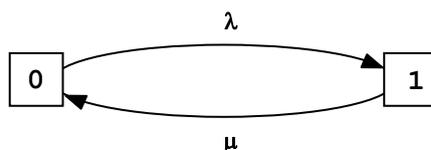
- i) Para um valor esperado de uma interrupção por ano (abscissa igual a 1) o valor máximo com garantia de 99% é superior ao valor esperado em cerca de 300% (ordenada para abscissa igual a 1) e, por isso, um padrão que não fosse violado com 99% de probabilidade teria que ser estabelecido com um valor igual ou superior a 4 interrupções.
- ii) Para um valor esperado de sete interrupções por ano (abscissa igual a 7) o valor máximo com garantia 99% é superior ao valor esperado em cerca de 100% (ordenada para abscissa igual a 7) e, por isso, um padrão que não fosse violado com 99% de probabilidade teria que ser estabelecido com um valor igual ou superior a 14 interrupções.

O racional para estabelecer máximos para a duração de interrupção é análogo.

Assumindo que o tempo médio de restabelecimento de serviço da rede que alimenta um determinado cliente é invariante no tempo e que, por isso, o valor esperado da duração das interrupções é também

invariante no tempo, os valores esperados obtidos para o tempo de interrupção podem ser interpretados como valores médios do tempo de restabelecimento (MTTR) e, como tal, o seu recíproco ($1/\text{MTTR}$) representar uma taxa de restabelecimento, μ .

Figura 8. Representação da transição entre estados (0: em serviço; 1: interrompido) para as quais são conhecidas as taxas de transição λ, μ .



A Fig. 8 apresenta uma interpretação Markoviana (simplificada) do processo conducente aos resultados para os valores esperados da CS por PdE, onde λ representa a *soma* das taxas médias de incidentes de todos os activos cuja indisponibilidade causa uma interrupção nesse PdE e μ representa o recíproco da *média ponderada* dos tempos de restabelecimento correspondentes a esses incidentes.

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$

$$\mu = \frac{\sum_i \lambda_i}{\sum_i \lambda_i T_i} = \frac{1}{\text{MTTR}}$$

O valor limite (estacionário) da probabilidade do serviço estar interrompido, P_1 , pode ser obtido em função das taxas como:

$$P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

Tomando a probabilidade P_1 como uma frequência relativa, podemos interpretar o produto $8760P_1$ como um valor esperado da duração anual de interrupção (em horas) -- o valor que conhecemos dos estudos de 2017 para cada PdE.

Como o valor das taxas de restabelecimento é muito grande comparado com o valor da taxa de incidentes², o valor esperado da duração das interrupções pode ser expresso como o produto $8760 \cdot \lambda \cdot MTTR$, uma vez que

$$P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \approx \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot MTTR$$

e, como tal, a distribuição probabilística da duração de interrupção pode ser obtida como uma função das distribuições probabilísticas do número de interrupções e dos tempos de restabelecimento $1/\mu$.

No entanto, para taxas de restabelecimento μ tão elevadas, a distribuição do tempo de restabelecimento aproxima-se necessariamente duma Gaussiana cuja variância relativa é tão pequena que não se justifica considerar a variabilidade do tempo de restabelecimento na determinação de valores máximos da duração de interrupção.

A Fig. 9 ilustra a FDP do tempo de restabelecimento para um PdE exposto a duas horas de interrupção por ano.

Desprezando a variância intrínseca ao tempo de restabelecimento, isto é, considerando que o tempo de restabelecimento é igual ao seu valor esperado para cada incidente, então a variância da duração (anual) das interrupções depende apenas do número de interrupções a que o PdE está exposto.

Assim, podemos considerar que o desvio relativo entre o valor máximo e o valor esperado da duração de interrupção assume o mesmo valor que o desvio relativo à frequência de interrupções, aplicando a mesma correcção para os dois indicadores em cada PdE, ou seja, que

$$N_{\text{máx}} = \lambda(1 + \delta)$$

$$T_{\text{máx}} \approx \frac{N_{\text{máx}}}{\mu} = \lambda(1 + \delta) \cdot MTTR$$

² Se considerarmos que os valores médios do tempo de restabelecimento são da ordem de algumas horas por ano, a taxa de restabelecimento é da ordem dos milhares [em ano^{-1}]. Note-se que para um valor esperado de duas horas de interrupção por ano, a taxa é $\mu = 1/2 \text{ h}^{-1} = 4380 \text{ ano}^{-1}$.

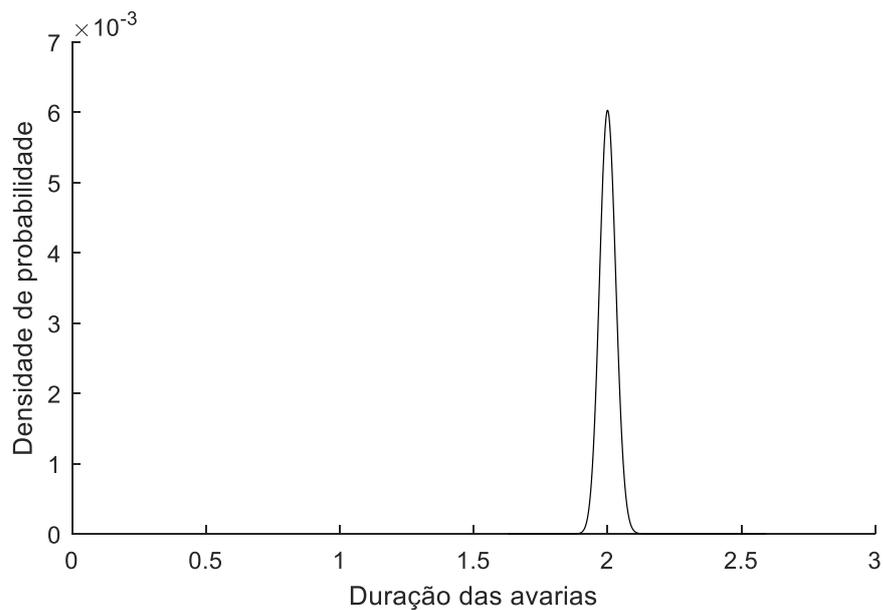


Figura 9. Densidade de probabilidade do tempo de restabelecimento para um PdE exposto a um valor esperado de duas horas de interrupção por ano ($\mu = 4380 \text{ ano}^{-1}$).

4.2 Avaliação de risco e padrões de continuidade de serviço

Nas expressões obtidas para os valores máximos, o desvio relativo δ depende do nível de confiança (garantia probabilística) pretendido. À evolução do desvio relativo como função do valor esperado da frequência de interrupções, observável na Fig. 7 (gráfico à direita), pode ser ajustada uma exponencial do tipo $\delta(\lambda) = \alpha\lambda^\beta$, onde os valores de α e β dependem do nível de confiança.

Em seguida, apresentam-se os desvios relativos a aplicar aos valores esperados obtidos nos estudos de 2017 de forma a obter os valores máximos dos indicadores de CS por PdE. Os desvios são apresentados para garantias de 99, 98 e 95%.

Os parâmetros utilizados no ajuste das exponenciais são apresentados na Tabela 1 para cada nível de confiança considerado juntamente com o respectivo coeficiente de correlação.

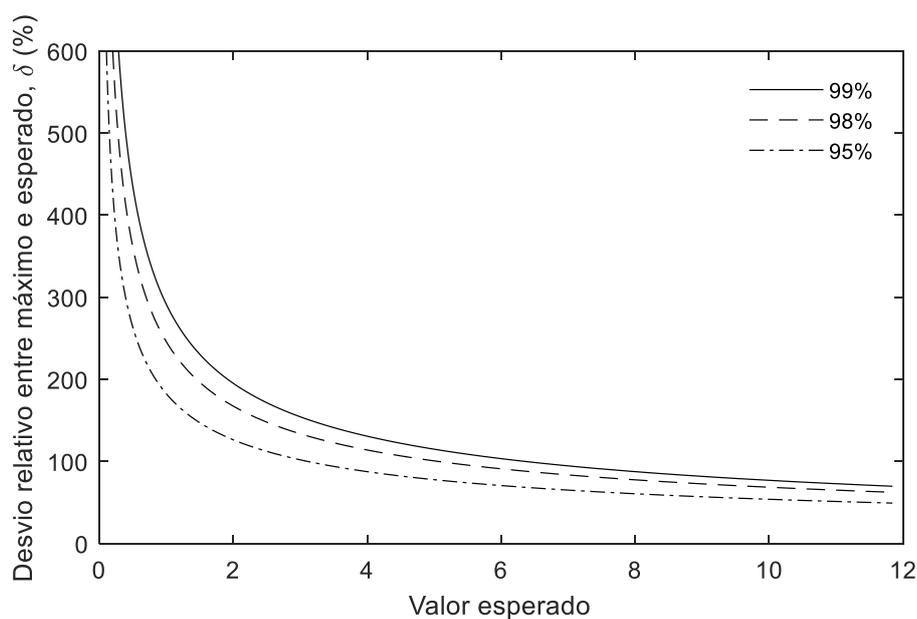


Figura 10. Resultados do ajuste de curvas do tipo $\alpha\lambda^\beta$ aos valores do desvio relativo entre os valores máximo e esperado do número de interrupções em função do valor esperado da frequência de interrupções, para níveis de confiança iguais ou superiores a 99, 98 e 95%.

Tabela 1. Resultados do ajuste de curvas do tipo $\alpha\lambda^\beta$ aos valores do desvio relativo entre os valores máximo e esperado do número de interrupções em função do valor esperado da frequência de interrupções (valores dos parâmetros α e β e do coeficiente de correlação).

Nível de confiança (%)	α (%)	β	r^2
99	291.31	-0.5779	0.96
98	245.78	-0.5544	0.94
95	182.43	-0.5295	0.89

Assim, propomos que os padrões de CS sejam revistos com base na avaliação do risco de incumprimento desses padrões em cada concessionária.

O risco deve ser avaliado comparando valores máximos com padrões, num processo que consiste nas seguintes etapas:

1. A partir dos valores esperados dos indicadores da CS obtidos em cada PdE, obter os correspondentes valores máximos com o nível

- de confiança pretendido (99, 98 ou 95%), utilizando para isso as exponenciais cujos parâmetros são apresentados na Tabela 1;
2. Para cada indicador da CS e Zona RQS, identificar os PdE para os quais é expectável que ocorram incumprimentos dos padrões, bem como a magnitude de tais incumprimentos. A magnitude pode ser estimada pelo valor acumulado dos incumprimentos relativos a cada indicador em cada Zona RQS.

Os valores máximos obtidos com determinado nível de confiança (ponto 1) são importantes na medida em que permitem não só avaliar a *sensibilidade* do número e magnitude dos incumprimentos face aos valores *actuais* dos padrões, como também a *sensibilidade* do número e magnitude dos incumprimentos a valores *revistos* dos padrões; mais concretamente, estas sensibilidades podem ser aferidas da distribuição de probabilidade acumulada (CDF) dos valores máximos ou, ainda, da função 1-CDF; enquanto que a CDF evidencia a proporção de PdE que *cumpre* os padrões, a função 1-CDF põe em evidência o *incumprimento* dos padrões.

Na Fig. 11, ilustra-se a diferença entre distribuições do número de PdE em cumprimento e número de PdE em incumprimento (gráficos à esquerda), bem como a sensibilidade dessas distribuições aos padrões de CS (gráficos à direita): para um valor do padrão do SAIFI de 10 interrupções por ano, 95% dos PdE estariam em cumprimento (5% em incumprimento) do padrão do SAIFI, enquanto que para 11 interrupções por ano se teria 97% de cumprimento (3% de incumprimento); um valor do padrão do SAIFI de 14 ou 15 interrupções por ano resultaria essencialmente no mesmo número de PdE em incumprimento (0,57 vs 0,55%).

Isto mostra que a análise de sensibilidade do nível de incumprimento dos padrões de CS é importante, pois conforme a distribuição dos valores máximos dos indicadores da CS com uma certa garantia, o nível de incumprimento pode ser muito ou pouco sensível aos valores dos padrões (tanto mais sensível quanto maior o declive da distribuição em torno do valor do padrão).

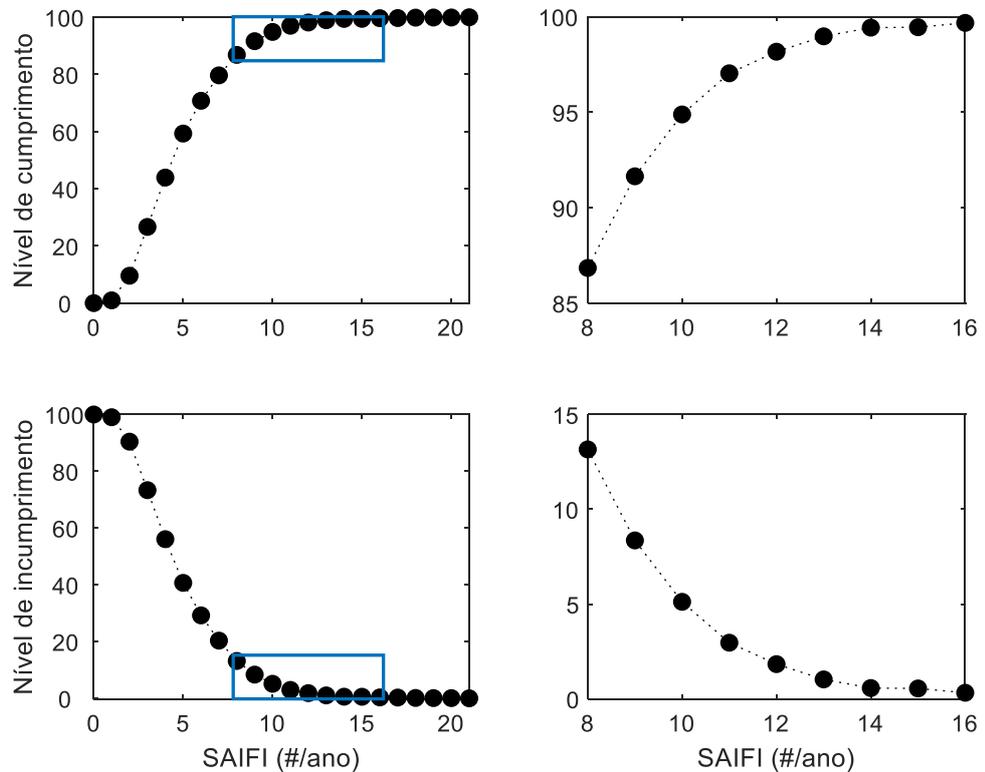


Figura 11. Distribuições do número de PdE em cumprimento e do número de PdE em violação dos padrões de CS (gráficos à esquerda), para um nível de confiança de 99%, e sensibilidades dessas distribuições a eventuais valores do padrão (gráficos à direita).

Assim, tendo em conta que para os valores esperados da CS por PdE é possível determinar valores máximos com o nível de garantia desejado e, por conseguinte, avaliar o risco de incumprimento dos padrões de CS (e a sensibilidade desse risco), então a revisão dos valores dos padrões deverá ter em consideração que, para uma garantia de cumprimento dos padrões considerada adequada, o risco de incumprimento dessa garantia, após revisão dos padrões, deverá ser reduzido.

4.3 Extensão da metodologia para a baixa tensão

A metodologia utilizada para obtenção de valores máximos na MT pode ser estendida para a baixa tensão (BT) de forma relativamente simples se assumirmos que:

- i) As redes BT aéreas com condutores nus quase não têm expressão e as redes aéreas com troçada têm taxas de incidentes muito semelhantes às redes BT subterrâneas a cabo;
- ii) As redes BT são responsáveis por muito menos interrupções nos PdE em BT do que as redes MT;
- iii) Os tempos de restabelecimento na rede BT são da mesma ordem de grandeza dos tempos de restabelecimento na rede MT.

Recuperemos a interpretação Markoviana do processo conducente aos resultados para os valores esperados da CS na MT (representada na Fig. 8 do capítulo anterior). Nessa linha de interpretação, para obter o valor esperado da frequência de interrupções na BT alimentada por um PdE MT, bastaria acrescentar ao valor esperado de cada PdE MT as interrupções devidas à rede BT alimentada por esse PdE. Para isso, basta aumentar o valor esperado da frequência de interrupções obtido para cada PdE na MT, λ_{MT} , do valor esperado da frequência de interrupções devidas à BT, λ_{BT} .

As redes BT são exploradas radialmente e raramente têm capacidade de manobra/reconfiguração para possibilitarem o restabelecimento parcial de serviço após o defeito. Por isso, e por termos assumido que as redes aéreas a troçada têm taxas de avarias muito semelhantes às das redes subterrâneas a cabo, podemos concluir que não há uma razão estrutural para existirem diferenças significativas de continuidade de serviço entre redes BT. Não sendo necessário distinguir, podemos então usar o valor médio do número de interrupções devidas a defeitos na BT, $E\{\lambda_{BT}\}$, para extrapolar para a BT o valor esperado da frequência de interrupções; assim:

$$\lambda' = \sum_i \lambda_i + E\{\lambda_{BT}\} = \lambda_{MT} + E\{\lambda_{BT}\}$$

Com o mesmo racional, podemos corrigir a *média ponderada* dos tempos de restabelecimento para incluir a contribuição da BT, corrigindo o seu recíproco μ com base nos tempos médios de restabelecimento da BT, $E\{T_{BT}\}$, como se indica a seguir:

$$\mu' = \frac{\sum_i \lambda_i + E\{\lambda_{BT}\}}{\sum_i \lambda_i T_i + E\{\lambda_{BT}\}E\{T_{BT}\}} = \frac{\lambda_{MT} + E\{\lambda_{BT}\}}{\frac{\lambda_{MT}}{\mu_{MT}} + E\{\lambda_{BT}\}E\{T_{BT}\}}$$

Tendo assumindo que as redes BT são responsáveis por muito menos interrupções nos PdE em BT que as redes MT, i.e., $E\{\lambda_{BT}\} \ll \lambda_{MT}$, e que os tempos de restabelecimento são da mesma ordem de grandeza na MT e na BT, i.e., $\mu_{MT} \approx \mu_{BT} = 1/E\{T_{BT}\}$, então o valor de μ' pode ser aproximado por

$$\mu' \approx \mu_{MT} \left(\frac{1}{1 + E\{\lambda_{BT}\}/\lambda_{MT}} \right) + \mu_{BT} \left(\frac{1}{1 + \lambda_{MT}/E\{\lambda_{BT}\}} \right) \approx \mu_{MT}$$

Depois de corrigidos os valores esperados λ , μ para traduzirem os incidentes na rede BT, calculam-se os valores máximos da frequência e duração das interrupções na BT da mesma forma que para a MT mas agora para os valores corrigidos de λ' , μ' :

$$N_{\text{máx}} = \lambda'(1 + \delta)$$

$$T_{\text{máx}} \approx \frac{N_{\text{máx}}}{\mu'}$$

5. Conclusão

Foram analisados os resultados obtidos em 2017 para os valores esperados calculados para os indicadores individuais de CS na rede MT das principais concessionárias da rede de distribuição em Portugal. Os resultados foram agregados por área de rede e comparados com os indicadores gerais de CS conhecidos para cada área de rede. Foram também agregados por concessão e comparados com os indicadores gerais de CS publicados. As comparações realizadas mostraram que os valores esperados calculados têm grande aderência aos indicadores conhecidos e publicados. Tal resultou da cuidada parametrização dos processos de restabelecimento, bem como do realismo inerente ao modelo de simulação utilizado na análise.

Os resultados obtidos para os valores esperados dos indicadores individuais de CS representam a melhor informação possível de obter sobre as consequências dos incidentes característicos das redes de distribuição e sobre o desempenho expectável dos operadores dessas redes na resolução desses incidentes. Por serem resultados por PdE, representam informação de alta resolução geográfica/territorial, e por isso são os resultados que devem ser usados para estabelecer novos Padrões de CS ou novas definições das Zonas RQS.

Com o intuito de estabelecer novos Padrões de CS, foi apresentado um método para determinar valores máximos dos indicadores individuais a partir dos valores esperados conhecidos desde 2017 para esses indicadores. Os fundamentos do método foram apresentados e foram propostas formas expeditas de obter os valores máximos dos indicadores individuais a partir de valores esperados para cada PdE e para cada indicador de continuidade.

Com base nos valores máximos dos indicadores individuais, foi proposta uma metodologia de risco para definir Padrões de CS. A proposta apresentada consistiu em garantir que o risco de incumprimento se mantinha reduzido para os novos padrões, em cada Zona RQS e em cada concessionária. Foi apresentada ainda uma forma de estender a metodologia de risco à definição de Padrões de CS para a BT.