

Otimização da Resiliência de uma Rede de Distribuição Baseado em Custos de Projeto

Beatriz Sales, Helder Diniz, Isis Lins, Marcio Moura, Edgar Braga
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

Enrique Lopez Droguett
Universidade de Maryland, EUA

1. INTRODUÇÃO

Devido a grande necessidade de atendimento da demanda e com o aumento da complexidade dos sistemas produtivos, as entidades e sistemas tendem a ser cada vez mais exigidas em termos do nível de resiliência em que se encontram após um evento indesejado. Isso se agrava ainda mais em sistemas críticos de infraestrutura, os quais são fundamentais para a rotina da sociedade (distribuição de energia elétrica, distribuição de água e suprimentos de materiais). Esses sistemas são caracterizados críticos por assumir a forma de uma rede, existindo uma dependência entre os nós e links, formando interconexão com outras redes de infraestrutura, assim como indústrias.

Nesse contexto, o termo resiliência é geralmente entendida como a capacidade de uma entidade para se recuperar de um perturbador externo como riscos, ameaças, choques, distúrbios, desastres e anomalias. Dessa forma, o sistema deve resistir, absorver e recuperar-se com êxito dos efeitos desses eventos perturbadores, adaptando-se à adversidade ou a uma mudança nas condições normais de operação. Ou seja, a resiliência envolve a redução tanto da magnitude quanto da duração dos efeitos de um evento sob a performance normal do sistema.

Diferente da avaliação de risco tradicional, que está preocupada com as probabilidades dos eventos perturbadores e suas consequências, a resiliência preocupa-se com a resistência e recuperação do sistema. Por exemplo, recentemente alguns estados brasileiros foram afetados com apagões o que deixou milhões de pessoas sem abastecimento de energia, enfatizando a necessidade de medidas preventivas adequadas e de respostas rápidas para promover a recuperação eficaz contra eventos perturbadores.

No contexto da resiliência, é necessário avaliar três medidas principais: a probabilidade de ocorrência de um evento perturbador, o seu impacto sobre o sistema (por exemplo, perda ou redução da capacidade de realizar a função designada), bem como o tempo e os recursos necessários para a reparação do sistema. Assim, dada a ocorrência de um evento perturbador, as duas últimas quantidades podem ser traduzidas respectivamente em despesas com o Impacto no Sistema (IS) e em Custo Total de Recuperação do sistema (CTR).

É importante observar que um sistema que é projetado para absorver os impactos de um evento indesejável, possui um IS menor e, conseqüentemente, é mais resiliente. Além disso, a velocidade de recuperação é influenciada pelos recursos despendidos nessa ação, ou seja, quanto maior o CTR, mais resiliente será o sistema.

A maioria dos trabalhos de pesquisa sobre resiliência tem focado no estabelecimento de políticas pós-evento, embora as ações pré-evento promovam maior agilidade para a recuperação do sistema e maior eficácia em termos de custos, especialmente quando eles são implementados durante a fase de projeto do sistema. Portanto, os investimentos pré-evento correspondem à promoção de três capacidades diferentes: absorção (absorver perturbações do sistema e minimizar as consequências), adaptação (ajustar a situações indesejáveis, passando por algumas mudanças) e recuperação (rapidez e facilidade pelo qual o sistema se recupera ao funcionamento normal). Essas despesas podem ser definidas como Investimento em Projeto para Resiliência (IPR).

Estudos de Engenharia de Resiliência pode ser encontrados em diversas aplicações como infraestrutura Crítica [1], Gestão de Segurança de sistemas[2], Resiliência organizacional [3], Resiliência Ecológica [4].

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Como forma de evitar ou minimizar os impactos após a ocorrência de um evento, as empresas estão buscando ferramentas que apoiem as decisões relacionadas com os investimentos na estratégia de resiliência

O objetivo deste trabalho foi aplicar um modelo de otimização para a resiliência sobre a concepção de uma rede logística, investindo nas capacidades de absorção, adaptação e de recuperação (decisões pré-evento) como um complemento para as estratégias eficazes de recuperação pós-evento, a fim de determinar a alocação ótima de todos os recursos e minimizar o impacto total no sistema considerando uma gama de possíveis cenários indesejáveis.

3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

O modelo executa um *trade-off* entre o custo de promover uma melhoria no projeto do sistema (IPR) e o custo esperado do impacto sobre o sistema e os esforços de recuperação (IS mais CTR). Os dados disponíveis foram coletados de uma empresa de logística, cujo campo de atuação principal corresponde à dois estados do Nordeste do Brasil. Neste caso, o sistema é composto por um conjunto de centros de distribuição (CDs) denotados por j , que entregam um produto (ou um conjunto de produtos) para os clientes varejistas da região, denotados por i . O modelo de otimização é definido como um problema de programação linear inteira mista (PLIM), que envolve cenários cuja ocorrência é incerta. Como forma de explorar as suas possibilidades, foram considerados dois cenários distintos, que refletem as diferentes combinações pelas quais os DCs podem falhar, a fim de mostrar como essas mudanças afetarão os investimentos necessários para atingir um projeto resiliente ótimo.

Sob condições normais, cada cliente possui uma demanda q_{it} (Tabela 2), que é atendida por um DC específico (fornecedor primário), cada qual com capacidade K_j (Tabela 1), correspondente à demanda que lhe é atribuída para cada período. Como forma de simplificação, foi considerado que a demanda dos clientes é constante no tempo. Os clientes são atendidos pelo DC mais próximo, de modo que a distância entre o cliente i e o DC_j , corresponde a d_{ij} . De fato, esta hipótese é consistente com a realidade, uma vez que os custos de frete (θ_{ij}) estão associados ao espaço onde o cliente está localizado em relação ao DC_j , considerando uma distância limite.

Além disso, os clientes e os DC's estão localizados em duas capitais e duas cidades do interior que alcançaram amplo desenvolvimento ao longo dos últimos anos. A fim de manter a privacidade da empresa e seus clientes, seus nomes serão preservados. A tabela 2 resume a localização de 30 clientes espalhados por dois estados no nordeste do Brasil, suas demandas e seus fornecedores primários (DC), que podem ser: REC (Recife-PE), CAR (Caruaru-PE), JAP (João Pessoa-PB) e CPV (Campina Grande-PB).

Tabela 1 – Capacidade dos DCs

DC	Capacidade unidades
REC	74.387
CAR	19.983
JPA	58.193
CPV	4.078
Total	156.641

Tabela 2 – Localização, demanda mensal e fornecedor primário de cada cliente

Consumidor	Cidade, Estado	Demanda	Fornecedor primário				
		unidades					
1	Recife, PE	5.783	REC	12	João Pessoa, PB	4.344	JPA
2	Recife, PE	16.562	REC	13	João Pessoa, PB	1.650	JPA
3	Recife, PE	20.581	REC	14	Campina Grande, PB	2.271	CPV
4	Recife, PE	15.275	REC	15	Campina Grande, PB	1.404	CPV
5	Recife, PE	8.075	REC	16	Campina Grande, PB	403	CPV
6	Recife, PE	8.111	REC	17	Caruaru, PE	1.451	CAR
7	João Pessoa, PB	13.570	JPA	18	Caruaru, PE	5.249	CAR
8	João Pessoa, PB	6.121	JPA	19	Caruaru, PE	3.507	CAR
9	João Pessoa, PB	2.258	JPA	20	Caruaru, PE	932	CAR
10	João Pessoa, PB	12.038	JPA	21	Caruaru, PE	8.844	CAR
11	João Pessoa, PB	18.212	JPA	Total		156.641	

No presente trabalho, foi seguida uma abordagem semelhante à [5], de modo que o modelo é construído em torno das seguintes variáveis:

w_j - Capacidade adicional designada ao DC_j (por período)

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se cliente } i \text{ está ligado ao } DC_j \\ 0 & \text{se não} \end{cases}$$

R - Capacidade adicional para ações de recuperação (unidades/período)

r_{jts} - Capacidade do DC_j recuperada no período t do cenário s

U_{jts} - Capacidade do DC_j disponível em cada período t do cenário s

x_{ijts} - Proporção da demanda do cliente i atendida pelo DC_j no período t do cenário s

y_{its} - Proporção da demanda do cliente i que não é atendida no período t do cenário s

O_{jt} - Capacidade do DC_j terceirizada no período t (unidades)

Além disso, os parâmetros considerados no modelo são descritos a baixo.

T - Período de tempo considerado (meses)

B_t - Recursos para recuperação disponíveis no período t (unidades)

F_j - Custo para adicionar uma unidade de capacidade ao DC_j

K_j - Capacidade inicial do DC_j

h_t - Investimento necessário para adicionar uma unidade de capacidade para ações de recuperação no período t

q_{it} - Demanda do cliente i no período t

d_{ij} - Distância entre o DC_j e o cliente i

p_s - Probabilidade do cenário s

G - Limite de investimento

γ_{js} - Fração da capacidade do DC_j que permanece disponível logo depois da ocorrência do evento indicado pelo cenário s

$j^*(i)$ - DC mais próximo do cliente i em condições normais (fornecedor primário)

$\eta, \lambda, \phi, \varepsilon, \mu$ = coeficientes de conversão das unidades em custo

Vale ressaltar que o limite de investimento definido (G) corresponde ao valor que define um evento extremo, ou seja, um evento com consequências catastróficas que torna inviável a prevenção. De acordo com as informações apresentadas, o modelo pode ser formulado da seguinte forma.

$$\text{Minimizar Custo} = \sum_j F_j w_j + \sum_i \sum_j \theta_{ij} z_{ij} + R \sum_t h_t + \sum_s p_s \left[\lambda \sum_i \sum_j d_{ij} \sum_t q_{it} x_{ijts} + \phi \sum_i \sum_t q_{it} y_{its} + \mu \sum_j \sum_t r_{jts} + \eta \sum_j \sum_t O_{jts} + \varepsilon \sum_j \sum_t (K_j + w_j - U_{jts}) \right]$$

Sujeito à

$$x_{ijts} - z_{ij} \leq 0 \quad \forall i, j, t, s$$

$$\sum_j z_{ij} \leq 2 \quad \forall i$$

$$z_{ij^*(i)} = 1 \quad \forall i$$

$$\sum_j x_{ijts} + y_{its} = 1 \quad \forall i, t, s$$

$$\sum_i q_i x_{ijts} \leq U_{jts} \quad \forall j, t, s$$

$$U_{jts} = \gamma_{js} (K_j + w_j) + \sum_{\zeta < t}^{\zeta} r_{jts} + O_{jts} \quad \forall j, t, s$$

$$O_{jts} \leq 0,3 (K_j + w_j)$$

$$O_{jts} \leq K_j + w_j - U_{jts}$$

$$U_{jts} \leq K_j + w_j \quad \forall j, t, s$$

$$U_{jTs} = K_j + w_j \quad \forall j, s$$

$$\sum_j F_j w_j + \sum_i \sum_j \theta_{ij} z_{ij} + R \sum_t h_t + \lambda \sum_i \sum_j d_{ij} \sum_t q_{it} x_{ijts} + \phi \sum_i \sum_t q_{it} y_{its} + \mu \sum_j \sum_t r_{jts} +$$

$$\eta \sum_j \sum_t O_{jts} \leq G \quad \forall j, s$$

$$\sum_j r_{jts} \leq B_t + R \quad \forall t, s$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j$$

$$w_j, x_{ijts}, y_{its}, r_{jts}, U_{jts}, V_s \geq 0 \quad \forall i, j, t, s$$

O modelo foi executado utilizando o software Gusek^{TD} e como uma forma de explorar as suas possibilidades, foram analisados dois cenários. Além disso, o modelo considerou a possibilidade de terceirização de parte da capacidade, prática identificada como recorrente neste setor.

O parâmetro θ_{ij} corresponde ao custo do frete e foi definido para cada conexão entre o cliente e o centro de distribuição de acordo com a zona a qual o consumidor i pertence relação ao DC_j . As zonas são definidas de acordo com a cidade onde os clientes estão localizados. Por exemplo, para REC a ordem da melhor para a pior área é definida da seguinte forma: Recife, Caruaru, João Pessoa e Campina Grande. Vale ressaltar que as distâncias entre i e j foram obtidas através do Google Maps. Os valores dos outros parâmetros são apresentados a seguir.

$T = 12$ meses

$B_i = 14000$ unidades/período

$h_i = 300$ reais em unidade/período

$F_j = 100$ reais em unidades/DC

$\lambda = 1$ real em unidade/km

$\phi = 1000$ reais/unidade

$\varepsilon = 10$ reais/unidade

$\mu = 5$ reais/unidade

$G = 1000000000$ reais

$\eta = 1000$ reais/unidade

4. RESULTADOS OBTIDOS

A diferença entre oferta e demanda pode ocorrer devido à picos de demanda ou falta de capacidade, que neste caso pode ser causada por eventos perturbadores que atingem a capacidade de armazenamento ou transporte de materiais ou a falta de mão de obra. Vale ressaltar que para a situação em que não existe a probabilidade de ocorrência de um evento indesejado sob o sistema, teoricamente nenhum investimento pré-evento deve ser realizado, visto que não existe o risco de ocorrência de falha. Desse modo, como forma de testar o modelo definido, o primeiro experimento realizado consistiu em analisar os resultados para o cenário em que existe 100% de chance de que nenhum evento venha a afetar a performance do sistema. Para esse caso, o modelo apresentou resultados satisfatórios, de acordo com o esperado. Na tabela 3 é apresentado esse e os outros experimentos realizados e seus principais resultados (referentes aos investimentos iniciais) são apresentados comparativamente na tabela 4.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Este artigo visa propor a aplicação de um modelo para otimizar a capacidade de resiliência de uma rede de distribuição, investindo na absorção, adaptação e capacidades de restauração (decisões pré-evento) como um complemento à estratégias de recuperação eficazes. Com isso, o sistema tende a ser menos suscetível aos impactos causados pela ocorrência de um evento perturbador, reduzir tanto a duração quanto os custos associados.

O modelo de otimização é definido como um problema de programação linear inteira mista. Envolve cenários cuja ocorrência é incerta e contém variáveis que são determinadas antes do efeito do evento sob o sistema ser conhecimento, e variáveis que são definidas para cada cenário. Os resultados foram apresentados apenas para dois cenários, mas uma grande variedade de outros ensaios numéricos poderia ser feito com o modelo e que pode ser facilmente adaptada a outros contextos.

Trabalhos futuros envolverão a exploração de mais possibilidades para esse problema, tanto em relação aos tipos de investimentos pré-evento considerados quanto ao seu campo de aplicação. Uma das possibilidades consiste em analisar o efeito conjunto do nível de serviço desejado para o sistema e da ocorrência de um evento perturbador no mesmo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] FILIPPINI , R. & SILVA, A. “A modeling framework for the resilience analysis of networked systems-of-systems based on functional dependencies”. *Reliability Engineering and System Safety*. vol.125 (2014).
- [2] DINH, L.T.T. PASMAN, H. GAO, X. & MANNAN,M.S.. “Resilience engineering of industrial processes: Principles and contributing factors”. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*: vol.25, 233-241 (2012)
- [3] RENIERS, G.L.L. SORENSEN, K. KHAN, F. & AMYOTTE, P. “Resilience of chemical industrial areas through attenuation-based security”. *Reliability Engineering and System Safety*: 94–101 (2014).
- [4] CHOPRA, S.S. & KHANNA, V.” Understanding resilience in industrial symbiosis networks: Insights from network analysis”. *Journal of Environmental Management*: 141 86 -94, (2014).
- [5] VUGRIN, E.D. & TURNQUIST, M.A.” Design for Resilience in Infrastructure Distribution Networks”. *Sandia Report – SAND2012-6050*, (2012).