



XVIII Congresso Internacional de Custos
XXX Congresso Brasileiro de Custos

15 a 17 de novembro de 2023
Natal / RN / Brasil



Otimizando os Custos de Qualidade na Cadeia de Suprimentos de Produtos Complexos: Uma Abordagem Integrada ao Valor da Qualidade

Vinicius Silva Pereira (ufu) - viniciuss56@gmail.com

Antonio Sergio Torres Penedo (UFU) - drpenedo@gmail.com

Resumo:

Este artigo enfoca a otimização do custo da qualidade na cadeia de suprimentos de produtos complexos, com o objetivo de aprimorar o controle de qualidade e mitigar riscos na cadeia de suprimentos. Para alcançar esse propósito, o conceito de valor é introduzido, seguido por uma análise detalhada da rede de fornecedores. É desenvolvido um mecanismo específico para a formação do valor de qualidade, adaptado aos produtos complexos, levando em conta o valor intrínseco desses produtos em relação à qualidade. Para quantificar o nível de valor de qualidade dos produtos complexos, o trabalho estabelece um modelo de rede GERT (Graphical Evaluation and Review Technique), permitindo realizar cálculos quantitativos pertinentes. O próximo passo consiste na formulação de um modelo de otimização que identifica os fornecedores-chave dentro da rede. Esse modelo é crucial para a proposta do método de otimização de custos de qualidade na cadeia de suprimentos de produtos complexos, enfocando o nível de valor. A abordagem tem como meta maximizar a eficiência dos custos de qualidade, fortalecendo a cadeia de suprimentos. Por fim, o trabalho valida cientificamente o modelo e método propostos ao aplicá-los a um exemplo concreto. Essa aplicação prática demonstra a viabilidade e a eficácia das abordagens sugeridas, tornando-as relevantes para enfrentar os desafios da cadeia de suprimentos de produtos complexos.

Palavras-chave: *Otimização do Custo da Qualidade. Produtos Complexos. Cadeia de Suprimentos. Modelo de Rede GERT*

Área temática: *Métodos quantitativos aplicados à gestão de custos*

Otimizando os Custos de Qualidade na Cadeia de Suprimentos de Produtos Complexos: Uma Abordagem Integrada ao Valor da Qualidade

RESUMO

Este artigo enfoca a otimização do custo da qualidade na cadeia de suprimentos de produtos complexos, com o objetivo de aprimorar o controle de qualidade e mitigar riscos na cadeia de suprimentos. Para alcançar esse propósito, o conceito de valor é introduzido, seguido por uma análise detalhada da rede de fornecedores. É desenvolvido um mecanismo específico para a formação do valor de qualidade, adaptado aos produtos complexos, levando em conta o valor intrínseco desses produtos em relação à qualidade. Para quantificar o nível de valor de qualidade dos produtos complexos, o trabalho estabelece um modelo de rede GERT (*Graphical Evaluation and Review Technique*), permitindo realizar cálculos quantitativos pertinentes. O próximo passo consiste na formulação de um modelo de otimização que identifica os fornecedores-chave dentro da rede. Esse modelo é crucial para a proposta do método de otimização de custos de qualidade na cadeia de suprimentos de produtos complexos, enfocando o nível de valor. A abordagem tem como meta maximizar a eficiência dos custos de qualidade, fortalecendo a cadeia de suprimentos. Por fim, o trabalho valida cientificamente o modelo e método propostos ao aplicá-los a um exemplo concreto. Essa aplicação prática demonstra a viabilidade e a eficácia das abordagens sugeridas, tornando-as relevantes para enfrentar os desafios da cadeia de suprimentos de produtos complexos.

Palavras-chave: Otimização do Custo da Qualidade. Produtos Complexos. Cadeia de Suprimentos. Modelo de Rede GERT

Área Temática: Métodos quantitativos aplicados à gestão de custos.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, no desenvolvimento de produtos complexos, o gerenciamento da cadeia de suprimentos adota predominantemente o modelo "fabricante-fornecedor principal", aplicado em setores como navios, aeronaves, satélites e veículos de lançamento. Nesse contexto, o principal fabricante é responsável pelo design e pelos padrões de qualidade gerais, enquanto as tarefas de P&D e fabricação são delegadas aos fornecedores. Esse modelo oferece a vantagem de permitir que o principal fabricante se concentre em tecnologias essenciais e aprimore a eficiência de P&D, ao livrar-se de tarefas mais operacionais.

Entretanto, essa abordagem descentralizada também traz consigo desafios, como o aumento da complexidade e a dificuldade no controle de qualidade da cadeia de suprimentos, requerendo capacidades mais elevadas do fabricante principal em termos de controle de qualidade. A otimização do custo de qualidade emerge como um meio crucial para o controle eficaz da qualidade de produtos complexos. A busca pela melhoria da qualidade do produto e a redução de perdas internas e externas têm levado o principal fabricante a otimizar continuamente os custos de qualidade e a investir em garantia de qualidade. Contudo, muitas vezes,

essas ações resultam em impactos limitados na melhoria do nível de qualidade geral, enquanto o custo de desenvolvimento permanece elevado e ocorrem perdas de qualidade de tempos em tempos.

É notório que a otimização do custo de qualidade dentro de uma única empresa dificilmente levará a melhorias significativas no nível de qualidade de toda a cadeia de suprimentos. Exemplos como o fracasso do lançamento do foguete Yao-2 da Longa Marcha 5 demonstram que problemas de qualidade podem estar associados a elos específicos da cadeia de suprimentos, e não necessariamente ao design do produto pelo fabricante principal.

Dessa forma, diante de recursos limitados, surge a necessidade de elevar o problema da otimização de custos de qualidade para o nível da cadeia de suprimentos. Nesse contexto, identificar os elos-chave de qualidade sob a ótica da cadeia de suprimentos e otimizar a estrutura de custos de qualidade de maneira alvo tornam-se questões relevantes. O objetivo é reduzir os custos de desenvolvimento e os riscos de qualidade, aprimorando, assim, a competitividade da qualidade na cadeia de suprimentos. Essas questões são dignas de investigação aprofundada para potencializar a eficiência e a excelência da cadeia de suprimentos de produtos complexos

Nos últimos anos, pesquisadores nacionais e internacionais têm dedicado extensos estudos ao campo de gestão da cadeia de suprimentos de produtos complexos, resultando em avanços significativos. As pesquisas relevantes concentram-se em três aspectos principais:

Primeiro, o gerenciamento da cadeia de suprimentos de produtos complexos. Por exemplo, Jin et al. (2010) propuseram um método baseado na teoria de jogos colaborativos para o design de tolerâncias de fabricação, visando atender aos requisitos de qualidade do produto. Chen (2015) explorou a relação entre as características complexas dos sistemas de produtos e os riscos associados, por meio de estudos de caso. Chen et al. (2014) abordaram o gerenciamento ideal da cadeia de suprimentos em um contexto complexo.

Em segundo lugar, abordam-se as questões de gerenciamento da qualidade da cadeia de suprimentos. Castillo-Villar, Smith e Simonton (2012) consideraram o custo da qualidade em uma perspectiva global da cadeia de suprimentos. Pesquisas empíricas conduzidas por Thun e Hoenig (2011) analisaram a prática de gerenciamento de riscos na cadeia de suprimentos com base em 67 fabricantes de automóveis alemães. Franca et al. (2010) propuseram um método de avaliação de risco de baixa qualidade terceirizado na cadeia de suprimentos. Hsieh e Liu (2010) investigaram cenários não cooperativos para estratégias de investimento e inspeção de qualidade por fornecedores e fabricantes. Zeng, Phan e Matsui (2013) destacaram a importância da gestão interna da qualidade na empresa como elemento crucial da gestão da cadeia de suprimentos. Vanichchinda e Igel (2011) examinaram a relação entre práticas de gestão da qualidade total, gestão da cadeia de suprimentos e desempenho das empresas na indústria automotiva da Tailândia. Wang, Zhao e Cheng (2018) abordaram o problema de coordenação da cadeia, revelando a relação entre prevenção de perdas, controle de qualidade, nível ótimo de qualidade do produto, quantidade ideal de pedidos e utilidade da cadeia de suprimentos. Liu et al. (2012) empregaram a casa da qualidade e métodos de programação multiobjetivo para propor estratégias de revisão.

Em terceiro lugar, foram desenvolvidos métodos de otimização e controle de custos de qualidade. Khataie e Bulgak (2013) aplicaram a dinâmica de sistemas para construir um modelo de decisão para o custo da qualidade. Naidu (2008)

desenvolveu um modelo matemático para determinar as tolerâncias do produto que minimizam os custos totais, incluindo custos de fabricação e perdas de qualidade. Shang e You (2009) analisaram os fatores que influenciam o custo de qualidade e estabeleceram um modelo de controle de custo de qualidade usando redes neurais difusas. Wang, Zhao e Huang (2009) consideraram a transitividade e feedback do risco de qualidade, estabelecendo um modelo de controle de custos de qualidade da cadeia de suprimentos. Zhang e Wang (2011) e Pan e Xiao (2015) aplicaram a dinâmica de sistemas para construir um modelo de custo de qualidade baseado na satisfação do cliente.

Esses estudos têm contribuído significativamente para o aprimoramento da gestão da cadeia de suprimentos de produtos complexos, destacando a relevância da otimização do custo de qualidade como estratégia fundamental para garantir a qualidade dos produtos e a competitividade da cadeia de suprimentos.

A partir da revisão da literatura, fica evidente que a pesquisa sobre otimização de custos de qualidade nas cadeias de suprimentos de produtos complexos alcançou resultados notáveis. No entanto, identificam-se algumas áreas que requerem aprimoramento: (i) a maioria dos estudos sobre otimização de custos de qualidade concentra-se no contexto de uma única empresa, não abrangendo a complexa rede de fornecedores envolvida no desenvolvimento de produtos complexos. Isso limita a aplicabilidade dos métodos existentes de otimização de custos de qualidade aos produtos complexos; (ii) a pesquisa atual sobre a otimização de custos de qualidade, especialmente aquela baseada na curva de custo de qualidade de Juran, considera apenas a perspectiva da empresa de produção, não sendo a demanda de qualidade do cliente devidamente contemplada, o que pode resultar em falhas em atender às necessidades e expectativas do cliente, mesmo quando o custo de qualidade do fornecedor é otimizado e (iii) existe uma lacuna notável em relação a métodos e modelos contábeis de nível de qualidade específicos para o gerenciamento da cadeia de suprimentos, o que se traduz numa escassez de abordagens científicas e modelos adequados para avaliar o custo de qualidade na cadeia de suprimentos, limitando a eficácia das estratégias de gerenciamento.

Portanto, é fundamental direcionar esforços para preencher essas lacunas de pesquisa, buscando desenvolver métodos mais abrangentes e integrados para a otimização de custos de qualidade em cadeias de suprimentos de produtos complexos. A abordagem holística e centrada no cliente é essencial para garantir a satisfação dos clientes e aprimorar o desempenho da cadeia de suprimentos como um todo. Esse progresso científico será valioso para aprimorar a eficiência, competitividade e sustentabilidade das cadeias de suprimentos de produtos complexos em um cenário cada vez mais exigente e dinâmico.

Deste modo, buscando contribuir para as lacunas anteriormente destacadas, este artigo apresenta uma abordagem inovadora que se concentra na otimização de custos de qualidade na cadeia de suprimentos de produtos complexos.

Para isso, num primeiro momento é introduzido o conceito de "valor de qualidade" da cadeia de suprimentos, considerando o custo de desenvolvimento de produtos complexos e o nível de qualidade do produto. Num segundo momento a análise explora o mecanismo de formação do valor de qualidade para produtos complexos e define a meta de otimização de custo de qualidade da cadeia de suprimentos, tendo como base a rede de fornecedores de desenvolvimento de produtos complexos. Num quarto momento, a partir das discussões anteriores, é construído um modelo de rede GERT de valor de qualidade de produtos complexos,

que proporciona um método de cálculo quantitativo para avaliar o valor de qualidade. O trabalho detalha o design dos parâmetros, a função de geração de momento, os parâmetros de transferência equivalentes e o método de solução de parâmetros relevantes para o modelo proposto. Em seguida, são identificados os principais fornecedores, permitindo a construção de um modelo de otimização de custo de qualidade específico para fornecedores. O método complexo de otimização de custo de qualidade para a cadeia de suprimentos de produtos complexos leva em conta o nível de valor de qualidade, visando melhorar a eficiência do desenvolvimento de produtos complexos. São exploradas formas de otimizar a estrutura de custos de qualidade da cadeia de suprimentos, buscando aprimorar todo o processo. Por fim, um exemplo prático é utilizado para validar a eficácia e cientificidade do método e modelo propostos. Essa análise empírica demonstra a aplicabilidade e a relevância das abordagens sugeridas para otimizar os custos de qualidade na cadeia de suprimentos de produtos complexos, promovendo, assim, um gerenciamento mais eficiente e competitivo em um ambiente de negócios cada vez mais complexo e desafiador.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Produtos complexos são caracterizados por um longo ciclo de desenvolvimento, alto investimento, riscos significativos e relevância estratégica (Banihashemi & Shahraki, 2020). Em comparação com produtos convencionais, o desenvolvimento de produtos complexos exige rigorosos padrões de qualidade, visto que qualquer falha nesse aspecto pode acarretar graves problemas tanto internos quanto externos (Zeng, Phan & Matsui, 2013). Por exemplo, o desenvolvimento de veículos de lançamento espacial na China enfatiza os princípios dos "três altos" - "alta confiabilidade, alta segurança e alta qualidade", considerando a qualidade como fundamental para o setor aeroespacial e sua contínua evolução.

De acordo com a norma internacional ISO 9001:2008, qualidade é definida como o grau em que um conjunto de características inerentes atende aos requisitos (Banihashemi & Shahraki, 2020). Esses requisitos têm origem nos clientes, sendo a personificação do valor percebido por eles. Dessa forma, o grau em que o produto e a qualidade atendem às necessidades de valor do cliente refletem o valor da qualidade do produto.

O valor da qualidade em produtos complexos é influenciado por dois fatores principais: o nível de qualidade do produto e o custo de desenvolvimento. Sob um determinado custo de desenvolvimento, quanto maior for o nível de qualidade, maior será o valor da qualidade do produto (Pi, 2010). Da mesma forma, em um mesmo nível de qualidade, quanto menor for o custo de desenvolvimento, maior será o valor da qualidade do produto (Xu, Fang, & Liu, 2013).

É essencial enfatizar que satisfazer as necessidades de valor da qualidade dos clientes constitui o objetivo fundamental no desenvolvimento de produtos complexos (Xu, Fang, & Liu, 2013). Isso implica na busca constante por aprimoramentos na qualidade e na eficiência do processo de desenvolvimento, de modo a garantir que o produto final atenda às expectativas dos clientes, alcançando altos padrões de qualidade que reforçam a competitividade e a satisfação do mercado (Shafiei, Eshtehardian, Nasirzadeh & Arabi, 2023).

2.1 Análise do Mecanismo de Realização do Valor de Qualidade do Produto Complexo

No modelo de gerenciamento da cadeia de suprimentos "principal fabricante-fornecedor", a cadeia de suprimentos de desenvolvimento de produtos complexos é composta principalmente por clientes, principais fabricantes e múltiplos níveis de fornecedores, incluindo fornecedores de primeiro, segundo e terceiro níveis. Essa configuração resulta em uma rede de fornecedores extensa e complexa. Segundo Liu, Fang e Liu (2011), a realização do valor de qualidade do produto complexo depende da eficiência dessa rede de fornecedores.

Primeiramente, os clientes apresentam requisitos de valor de qualidade, como vida útil e segurança do produto (Xu, Fang, & Liu, 2013). Em seguida, o fabricante principal, levando em consideração as capacidades técnicas, de pesquisa e desenvolvimento, e de fabricação da rede de fornecedores, transforma os requisitos de valor de qualidade do cliente em processos complexos de desenvolvimento de produtos (Banihashemi & Shahraki, 2020). Nesse contexto, a meta de qualidade total é consultada para garantir a viabilidade da pesquisa e desenvolvimento do modelo (Xu, Fang, & Liu, 2013).

Posteriormente, ocorre a decomposição estrutural das tarefas de desenvolvimento do produto, e a meta de qualidade total é subdividida em objetivos de qualidade específicas para cada nível de fornecedor. Esses objetivos de qualidade são então internalizadas nos requisitos de cada elo de pesquisa e desenvolvimento (P&D) na cadeia (Xu, Fang, & Liu, 2013). Os fornecedores em todos os níveis investem em custos de P&D para cumprir os objetivos de qualidade e entregam os produtos aos fornecedores subsequentes. Por fim, o fabricante principal recebe os produtos dos fornecedores e os entrega aos clientes finais, atendendo assim às demandas do valor de qualidade dos clientes (Shafiei, Eshtehardian, Nasirzadeh & Arabi, 2023).

A Figura 1 apresenta esse framework do fluxo de desenvolvimento e entrega de produtos pelos fornecedores também representa o fluxo do custo total de pesquisa e desenvolvimento do produto na rede de fornecedores. Simultaneamente, a capacidade de transferência de produto da rede de fornecedores reflete o nível de qualidade da rede de P&D.

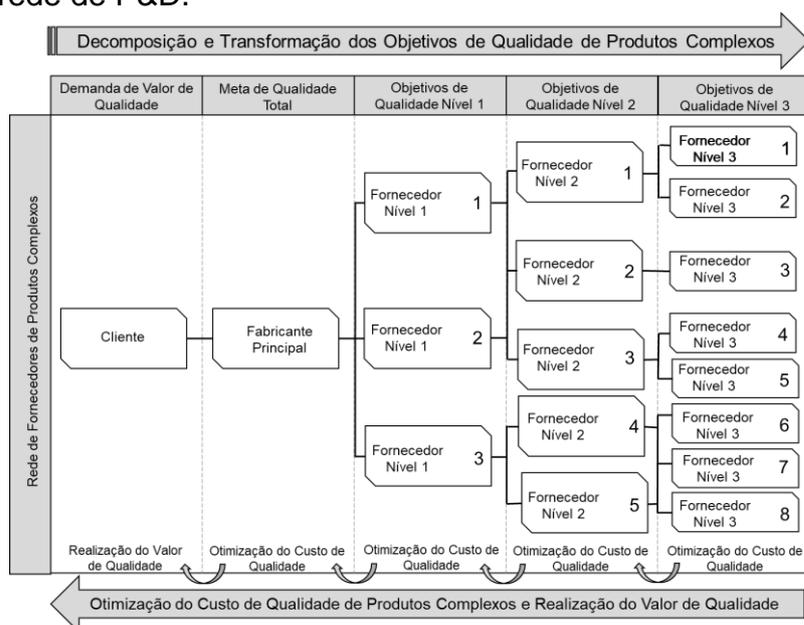


Figura 1. Mecanismo de realização de valor de qualidade do produto complexo com base na rede de fornecedores.

Fonte: Adaptado de Shafiei, Eshtehardian, Nasirzadeh & Arabi (2023).

Esse mecanismo revela a importância fundamental da rede de fornecedores eficiente para garantir a qualidade dos produtos complexos. A coordenação e comunicação efetiva entre os elos da cadeia de suprimentos são cruciais para que o valor de qualidade seja atingido com sucesso, possibilitando a satisfação das necessidades dos clientes e a competitividade do produto no mercado (Shafiei, Eshtehardian, Nasirzadeh & Arabi, 2023). A compreensão desse mecanismo é essencial para o aprimoramento contínuo do gerenciamento da cadeia de suprimentos de produtos complexos e a garantia de uma oferta confiável e de alta qualidade (Wang, Zhao & Cheng, 2018).

2.2 Otimização do Custo de Qualidade na Complexa Cadeia de Suprimentos de Produtos

O desenvolvimento de produtos complexos é um processo colaborativo que envolve o principal fabricante e os fornecedores em diversos níveis da rede de fornecedores. Ao realizar as tarefas de desenvolvimento, os fornecedores investem inicialmente em custos básicos de desenvolvimento, como materiais, equipamentos e mão de obra. Além disso, eles incorrem em custos de garantia de qualidade (incluindo prevenção e avaliação de custos) para atender aos requisitos de qualidade do fornecedor. No entanto, é inevitável que ocorram perdas de qualidade, internas e externas, que são coletivamente referidas como custos da qualidade (Naidu, 2008).

Diferentemente de produtos comuns, os produtos complexos apresentam altos insumos de custo de qualidade, representando uma proporção significativa do custo total de produção (Thun & Hoenig, 2011). Portanto, a otimização do custo de qualidade torna-se essencial.

Investir pouco em custos de garantia da qualidade reduz a qualidade do produto. Na rede de fornecedores de produtos complexos, é comum encontrar fornecedores que investem pouco em custos de garantia de qualidade, resultando em efeitos cascata de perda de qualidade aos fornecedores a jusante. Isso dificulta o alcance da meta de valor da qualidade (Shang & You, 2009).

Por outro lado, um aumento no custo de garantia de qualidade pode, paradoxalmente, reduzir a qualidade do produto, devido a um fenômeno conhecido como "efeito da burocracia da qualidade". Conforme destaca a teoria do custo de qualidade de Juran (Juran, 1951), o "efeito da burocracia da qualidade" ocorre quando a ênfase excessiva na documentação, inspeções rigorosas e processos burocráticos para garantir a qualidade acaba desviando a atenção dos aspectos essenciais da produção e do desenvolvimento de produtos. Em vez de focar na prevenção de defeitos e na melhoria contínua, as equipes podem se tornar excessivamente preocupadas em atender aos requisitos de garantia de qualidade.

Portanto, a teoria de Juran enfatiza a importância de equilibrar a garantia de qualidade com um compromisso contínuo com a prevenção de defeitos, a melhoria de processos e a criação de uma cultura de qualidade em toda a organização. Isso permitirá que a qualidade seja incorporada à essência do produto, em vez de ser apenas um conjunto de procedimentos burocráticos (Liu, Hiple, & Fang, 2012). Além disso, alguns fornecedores podem investir excessivamente em custos de garantia de qualidade, levando a níveis de qualidade excessivos e desperdício de recursos (Shafiei, Eshtehardian, Nasirzadeh & Arabi, 2023).

Assim, o objetivo da otimização do custo de qualidade na cadeia de suprimentos de produtos complexos é alcançar um equilíbrio ideal. Isso implica em otimizar os investimentos em custos de qualidade ao longo da cadeia de suprimentos e a estrutura dos custos de qualidade, garantindo que, sob a premissa do nível de qualidade necessário, o valor da qualidade do produto seja maximizado com o investimento mínimo em custos de qualidade. Ao atingir esse objetivo, as demandas de valor de qualidade dos clientes são plenamente atendidas, e o desempenho geral da cadeia de suprimentos é aprimorado.

3 METODOLOGIA DA CONSTRUÇÃO DO MODELO DE REDE GERT

Um modelo de rede GERT (*Graphical Evaluation and Review Technique*) é uma representação gráfica de um projeto ou processo que envolve várias atividades interligadas e suas dependências como, por exemplo, uma cadeia de suprimentos com vários fornecedores. O GERT é uma extensão do método PERT (*Program Evaluation and Review Technique*), mas inclui a capacidade de modelar incertezas e variações nas durações das atividades, bem como lida com a ocorrência de eventos condicionais.

O GERT utiliza uma estrutura de rede que consiste em nós e setas, onde os nós representam eventos (momentos no tempo) e as setas representam as atividades que devem ser concluídas para atingir esses eventos. Cada atividade tem um tempo estimado de duração associado, mas a principal característica do GERT é a capacidade de lidar com incertezas nas durações das atividades.

O GERT é frequentemente utilizado para modelar e analisar projetos e processos complexos, onde a incerteza e a variabilidade são fatores importantes. Ele permite a avaliação de diferentes cenários, considerando diferentes durações possíveis para as atividades e avaliando como essas variações podem afetar o tempo total do projeto ou processo. Isso é particularmente útil quando há dependências entre as atividades e quando eventos condicionais podem afetar a sequência de atividades.

No contexto de problemas de otimização, um modelo de rede GERT pode ser utilizado para identificar as melhores estratégias para minimizar custos. Ao considerar as incertezas nas durações das atividades, o GERT permite avaliar o impacto das variações e tomar decisões mais informadas sobre como planejar e executar projetos ou processos de forma mais eficiente.

3.1 Composição básica do modelo

O modelo de rede GERT de valor de qualidade de produto complexo é composto por três elementos básicos: nós, setas e fluxos. O fluxo das atividades de entrega de produtos entre fornecedores reflete a relação quantitativa de atividades de entrega de produtos entre os nós.

As unidades são mostradas na Figura 2: nó i é o fornecedor a montante; nó j é o fornecedor a jusante ou fabricante principal; atividade (i, j) é a atividade de transferência de produto entre o fornecedor i e o fornecedor j ; QV_{ij} é a qualidade do valor do produto realizado pela atividade (i, j) ; p_{ij} é a probabilidade condicional de que a atividade (i, j) seja executada na condição de que o nó i a realize, ou seja, após o produto fornecido pelo fornecedor i ser testado e inspecionado pelo

fornecedor a jusante j para todos os produtos, ou seja, a probabilidade de a entrega do produto ser realizada pelo fornecedor (i).

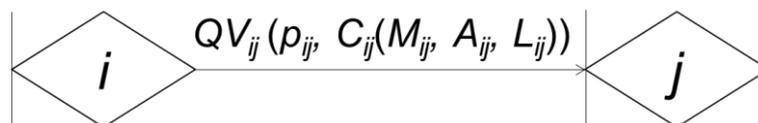


Figura 2. As unidades constituintes básicas da complexa rede GERT de valor de qualidade do produto

Fonte: Elaboração própria

O custo total de desenvolvimento de produtos complexos (C_{ij}) inclui o custo básico de desenvolvimento e o custo de qualidade, que podem ser divididos em três partes: custo básico de desenvolvimento (M_{ij}), custo de garantia de qualidade (A_{ij}), custo de perda de qualidade (L_{ij}), em que:

$$C_{ij} = M_{ij} + A_{ij} + L_{ij} . \quad (1)$$

O custo básico de desenvolvimento (M_{ij}) refere-se ao custo geral usado para manter o desenvolvimento em P&D básico, como custo de design, custo de material, custo de mão de obra básica, custo de operação da oficina, etc.

O custo de garantia da qualidade (A_{ij}) refere-se ao custo incorrido para garantia de qualidade externa, incluindo custos de prevenção pagos para evitar que os produtos não atendam à satisfação do cliente, como taxas de revisão, taxas de melhoria, etc., bem como testes e inspeções para avaliar se os produtos atendem aos requisitos de qualidade especificados.

O custo de perda de qualidade (L_{ij}) refere-se à perda causada pelo não atendimento os requisitos de qualidade do cliente, incluindo perdas internas causadas pela falha do produto em atender aos requisitos de qualidade especificados antes da entrega, como retrabalho, reparo etc., e falha do produto antes e depois da entrega. Refere-se a perda causada pela qualidade que pode atender a satisfação do cliente, como devoluções, reclamações, etc. (Wang, Zhao & Cheng, 2018).

3.2 Projeto de parâmetros do modelo

O custo básico de P&D é o investimento básico feito pelos fornecedores em todos os níveis para concluir a tarefa de P&D. Quando o fornecedor a jusante ou o principal fabricante apresenta a meta de P&D, essa parte do custo pode basicamente ser determinada ou estimada. Portanto, assume-se que na atividade (i, j) o custo básico de desenvolvimento (M_{ij}) investido é uma constante, a fim de considerar e analisar a influência mútua entre custo de qualidade e nível de qualidade de maneira mais intuitiva.

Supondo que os fornecedores em todos os níveis da rede de fornecedores tenham um mecanismo de inspeção de qualidade relativamente completo, o fornecedor a montante i tem n fornecedores a jusante j (j_1, j_2, \dots, j_n) e fornecedores a jusante para fornecedores a montante. Os produtos entregues por i estão sujeitos à inspeção de qualidade, e os produtos qualificados são transferidos para o fornecedor j através da inspeção de qualidade. Existem dois casos de produtos não qualificados. Se for um produto reparável, será devolvido ao fornecedor i para reparo

e, em seguida, entrará no processo de entrega do produto novamente, conforme mostra a atividade da Figura 3 (i, j); se for um produto não consertável, será devolvido ao fornecedor i e depois descartado diretamente, conforme mostra a atividade ($i, 0$) da Figura 3. Portanto, o fornecedor i na rede é transferido para o fornecedor a jusante j , sendo p_{ij} a probabilidade de que a atividade (i, j) seja executada pelo fornecedor j . A taxa de aprovação do produto produzido (p_{ii}) reflete o nível de qualidade do produto do fornecedor i .

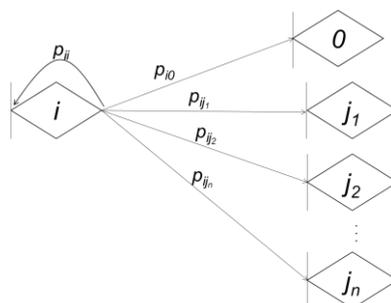


Figura 3. A relação entre a taxa de qualificação do produto do fornecedor i e a probabilidade de transferência de rede

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a teoria do custo da qualidade de Juran, o custo da perda de qualidade do produto (L_{ij}) e a taxa de aprovação do produto produzido (p_{ij}) e o custo de garantia da qualidade (A_{ij}) têm a seguinte relação: $L_{ij} = g (A_{ij})$, $L_{ij} \geq 0$, $A_{ij} \geq 0$, e $g'(A_{ij}) \leq 0$, $g''(A_{ij}) \geq 0$, ou seja, o custo da perda de qualidade diminui com o aumento do custo de garantia de qualidade, mas a utilidade marginal do custo de garantia de qualidade diminui, quando o custo da perda de qualidade diminui após o ponto mais baixo. Devido à limitação da tecnologia e capacidade de gerenciamento, a perda de qualidade não diminuirá mais se a entrada do custo de garantia de qualidade for aumentada: $q_{ij} = r (A_{ij})$, $A_{ij} \geq 0$, $0 \leq q_{ij} \leq 1$, e $r'(A_{ij}) \geq 0$, $r''(A_{ij}) \leq 0$, ou seja, o nível de qualidade do produto aumenta com o aumento do custo de garantia da qualidade, mas a utilidade marginal do custo de garantia da qualidade diminui. Nesse ponto o nível de qualidade atinge o valor mais alto, limitado por capacidades técnicas e de gestão e o nível de qualidade não pode ser melhorado pelo aumento do custo de garantia de qualidade. A relação funcional entre $L_{ij} = g (A_{ij})$ e $q_{ij} = r (A_{ij})$ pode usar a função linear por partes, a função exponencial, a função KKGovil e a função de produção Cobb-Douglas, etc. A forma da função específica e os valores dos parâmetros são determinados pelas características de qualidade do produto e pela capacidade de desenvolvimento do fornecedor. Assim, por meio da transformação da relação funcional entre as variáveis, o complexo multiparâmetro qualidade do produto, o valor da rede GERT é modelado como um modelo de parâmetro único.

3.3 Projeto da função geradora de momento do modelo e cálculo dos parâmetros de transferência equivalentes

A definição 2 assume que o custo de garantia de qualidade A_{ij} é uma variável aleatória contínua, a função de densidade de probabilidade $f (A_{ij})$, M_{ij} é uma constante, custo de perda de qualidade L_{ij} , nível de qualidade q_{ij} e custo total de desenvolvimento C_{ij} também são variáveis aleatórias, assumindo que a função densidade de probabilidade da C_{ij} é $f (C_{ij})$, define-se a função geradora de momento da variável aleatória C_{ij} como:

$$M_{ij}(S) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{sC_{ij}} f(C_{ij}) dC_{ij} \quad (1)$$

A definição 3 define o custo total de desenvolvimento (C_{ij}), função de transferência equivalente da atividade (i, j) como $W_{ij} = p_{ij} M_{ij}$, e W_{ij} pode ser usado para substituir os dois parâmetros C_{ij} e p em que a rede original ij calcula os parâmetros na rede.

A partir de então, deduz-se o Teorema 1. Nesta rede, se W_r é a função de transferência equivalente do enésimo ($r=1, 2, \dots, n$) caminho direto do nó u para o nó v , $W_k(L_m)$ é a ordem m do coeficiente de transferência equivalente do anel k no anel i , então a função de transferência equivalente W_{uv} do nó u para o nó v é

$$W_{uv} = \sum_{r=1}^n W_r \left[1 - \sum_m \sum_k (-1)^m W_k(L_m) \right] / \left[1 - \sum_m \sum_k (-1)^m W_k(L_m) \right] \quad (2)$$

Prova-se que como $W_i(L_m)$ é o coeficiente de transferência equivalente do anel i no anel de ordem m , a expressão característica da rede GERT é: $\Delta = 1 - \sum_m \sum_i (-1)^m W_i(L_m)$, após eliminar todos os nós e setas relacionados ao caminho r , a expressão característica restante é

$$\Delta_r = 1 - \sum_m \sum_{i \neq r} (-1)^m W_i(L_m) \quad (3)$$

onde W_r é a função de transferência equivalente do caminho direto r do nó u para o nó v , $r=1, 2, \dots, n$. De acordo com a fórmula de Mason do gráfico de fluxo de sinal, a transferência equivalente do nó u para o nó v pode ser conhecido pela equação 3.

3.4 Resolvendo parâmetros importantes - Nível de qualidade da rede complexa de desenvolvimento de produtos

A definição 4, na rede GERT, assume que o nó de origem S da rede é o fornecedor inicial da rede e o nó terminal T é o cliente final da rede. Se houver vários nós de origem ou vários nós terminais na rede, nós virtuais podem ser construídos para torna-la normalizada. A probabilidade de transferência equivalente p_{ST} da rede representa a possibilidade de transferência de produto entre o nó de origem S e o nó terminal T . Supondo que todos os níveis de fornecedores na rede de fornecedores tenham um mecanismo de inspeção de qualidade relativamente completo, então a probabilidade de transição do produto p_{ST} da atividade (S, T) é a taxa de aprovação do produto desenvolvido do nó de origem S para o nó final T , que reflete

o nível de qualidade do produto complexo rede de fornecedores de desenvolvimento, ou seja, $q_{ST} = p_{ST}$.

Constitui-se daí o Teorema 2 em que, na rede GERT, a função de transferência equivalente W_{ST} do nó fonte S para o nó terminal T , a probabilidade de transferência do produto do nó fonte S para o nó terminal T pode ser obtida como $p_{ST}(s) = W_{ST}(s) |_{s=0}$, a função geradora de momento equivalente, o nível de qualidade da rede de desenvolvimento de produtos complexos $q_{ST} = p_{ST}(s) = W_{ST}(s) |_{s=0}$.

Do Teorema 2, prova-se que, a partir das características da função geradora de momento equivalente, quando $s = 0$, temos:

$$W_{ST}(0) = p_{ST}M_{ST}(0) = p_{ST} \int_{-\infty}^{\infty} e^{sC_{ST}} f(C_{ST})dC_{ST}|_{s=0} = p_{ST} \quad (4)$$

Então a probabilidade de transferência equivalente do nó fonte S para o nó terminal T na rede GERT, ou seja, a probabilidade de transferência do produto é $p_{ST}(s) = W_{ST}(s)|_{s=0}$

3.5 Custo de desenvolvimento da rede complexa de desenvolvimento de produtos

De acordo com a definição 3, a função geradora de momento equivalente do nó fonte S ao nó terminal T da rede GERT é $M_{ST}(s) = \frac{W_{ST}(s)}{p_{ST}(0)} = \frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)}$. E de acordo com a definição 4, $q_{ST} = p_{ST}(s) = W_{ST}(s)|_{s=0}$, tem-se o teorema 3. Na rede GERT, a função de transferência equivalente do nó fonte S para o nó terminal T é W_{ST} , pode-se obter que o custo de desenvolvimento transferido do nó fonte S para o nó terminal T é o parâmetro transferido do nó fonte S para o nó terminal T . O momento de primeira ordem $E(C_{ST})$ de C_{ST} é igual ao valor que s é definido como 0 após o cálculo da derivada parcial de W_{ST} para s correspondente ao parâmetro C_{ST} , que é dada pela equação 5:

$$E(C_{ST}) = \frac{\partial \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s} \Big|_{s=0} \quad (5)$$

Prova-se que:

$$\frac{\partial \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s} \Big|_{s=0} = \frac{\partial \left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{sC_{ST}} f(C_{ST})dC_{ST} \right]}{\partial s} \Big|_{s=0} =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} C_{ST} e^{sC_{ST}} f(C_{ST}) dC_{ST} |_{s=0} = \int_{-\infty}^{\infty} C_{ST} f(C_{ST}) dC_{ST} = E(C_{ST}) \quad (6)$$

Tem-se, portanto, o corolário 1, em que a função de transferência equivalente do nó fonte S para o nó terminal T é $W_{ST}(s)$, e o momento de ordem n do parâmetro C_{ST} transferido do nó fonte S para o nó terminal T pode ser definido como:

$$E(C_{ST}^n) = \frac{\partial^n \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s^n} |_{s=0} \quad (7)$$

A partir do primeiro corolário, estabelece-se o teorema 4 em que a função de transferência equivalente do nó fonte S para o nó terminal T é $W_{ST}(s)$, e a variância de flutuação do parâmetro C_{ST} transmitida do nó fonte S para o nó terminal T pode ser obtida conforme equação 8:

$$V(C_{ST}) = \frac{\partial^2 \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s^2} |_{s=0} - \left(\frac{\partial \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s} |_{s=0} \right)^2 \quad (8)$$

Do corolário 1 sabe-se que $E(C_{ST}^2) = \frac{\partial^2 \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s^2} |_{s=0}$, então prova-se que:

$$V(C_{ST}) = E(C_{ST}^2) - [E(C_{ST})]^2 = \frac{\partial^2 \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s^2} |_{s=0} - \left(\frac{\partial \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s} |_{s=0} \right)^2 \quad (9)$$

Da mesma forma, o custo básico de desenvolvimento $E(M_{ST})$ e sua variação $V(M_{ST})$, o custo de garantia de qualidade $E(A_{ST})$ e sua variação $V(A_{ST})$, custo de perda de qualidade $E(L_{ST})$ e sua variação $V(L_{ST})$ e $E(C_{ST}) = E(M_{ST}) + E(A_{ST}) + E(L_{ST})$.

3.6 Valor de qualidade da complexa rede de desenvolvimento de produtos

A definição 5, de acordo com a análise da seção anterior, tem-se que o valor da qualidade de produtos complexos é diretamente proporcional ao nível de qualidade e inversamente proporcional ao custo de desenvolvimento. Sob a condição de um determinado custo de desenvolvimento, quanto maior o nível de qualidade, maior o valor de qualidade do produto; no mesmo nível de qualidade,

quanto menor o custo de desenvolvimento, maior o valor de qualidade do produto. Portanto, o valor de qualidade da complexa rede de desenvolvimento de produtos pode ser definido como o valor de qualidade do produto do nó de origem S para o nó terminal T , ou seja:

$$QV_{ST} = \frac{q_{ST}}{C_{ST}} = \frac{p_{ST}}{E(C_{ST})} \quad (10)$$

Por meio do modelo de rede GERT de produtos complexos, o nível de qualidade e o custo de desenvolvimento da rede de fornecedores podem ser obtidos e, conseqüentemente, o valor de qualidade da rede de desenvolvimento de produtos complexos também pode ser obtido.

3 Método de otimização de custos de qualidade da cadeia de suprimentos de produtos complexos com base no modelo de rede GERT

Nesta seção é apresentado o raciocínio para a construção do método de otimização de custos de qualidade da cadeia de suprimentos de produtos complexos com base no modelo de rede GERT. Na rede de desenvolvimento de produtos complexos, as capacidades de desenvolvimento e os níveis de qualidade dos fornecedores em todos os níveis são desiguais, o que restringe o nível de valor de qualidade da rede de desenvolvimento. O principal fabricante pode otimizar a qualidade e o custo da cadeia de suprimentos para muitos fornecedores. Para otimizar os custos de qualidade da cadeia de suprimentos de produtos complexos é necessário realizar o controle de qualidade em todos os fornecedores e identificar os principais fornecedores com baixo valor de qualidade entre os fornecedores em todos os níveis da rede e, em seguida, otimizar o custo de qualidade da cadeia de suprimentos de maneira direcionada, avançando camada por camada, de modo a atingir o investimento mínimo em custos de pesquisa e desenvolvimento por meio da otimização do custo da qualidade, ao mesmo tempo que atende às necessidades de qualidade e valor dos clientes.

Os fornecedores em todos os níveis afetam o nível de valor de qualidade da rede de fornecedores por meio do nível de valor de qualidade de seus próprios produtos, portanto, o fornecedor com o nível de valor de qualidade mais baixo entre os fornecedores em todos os níveis pode ser considerado o fornecedor-chave no nível do fornecedor.

Com isso, temos a definição 6, em que se assume que existem d fornecedores nos fornecedores de nível n , se $\forall t \in [1, d]$, $QV_{S_{nd}} \leq QV_{S_{nt}}$ é sempre estabelecido, então S_{nd} é o fornecedor chave nos fornecedores de nível n .

Tem-se então o teorema 5, em que se supõe que o fornecedor i forneça mercadorias ao fornecedor a jusante j , onde o produto p_{ij} é aceito com sucesso pela primeira vez e fornecido ao fornecedor a jusante, e a probabilidade de que o produto não passe na aceitação e seja devolvido ao fornecedor i por a manutenção é p_{ij} , e o produto não pode ser reparado e é descartado diretamente. A probabilidade de p_i é 0, e os custos de desenvolvimento pagos são respectivamente C_{ij} , C_{i0} , C_{ii} , então o nível de valor de qualidade do fornecedor i é:

$$QV_i = \frac{p_{ij}M_{ij}}{(1 - p_{ii}M_{ii})(C_{ij} + C_{i0} + C_{ii})} \Big|_{s=0}$$

(11)

Prova-se portanto que, de acordo com o princípio de operação da série de rede GERT, estrutura paralela e auto-loop, podemos obter que o nível de qualidade do fornecedor i é a probabilidade de que o produto seja entregue com sucesso ao fornecedor a jusante j , $q_i = p_{ij} = W_{ij}(s)|_s = 0$, o custo de desenvolvimento do fornecedor i é o custo total de desenvolvimento atividades do fornecedor $C_i = C_{ij} + C_{i0} + C_{ii}$, portanto, o nível de valor de qualidade do fornecedor é:

$$QV_i = \frac{q_i}{C_i} = \frac{p_{ij}M_{ij}}{(1 - p_{ii}M_{ii})(C_{ij} + C_{i0} + C_{ii})} \Big|_{s=0} \quad (12)$$

Em resumo, o teorema 5 é válido.

A otimização do custo da qualidade dos principais fornecedores pode efetivamente compensar as deficiências de qualidade da rede, melhorar a eficiência do custo da qualidade da rede e atingir a meta de otimização do custo da qualidade da cadeia de suprimentos. Na premissa de que o nível de qualidade otimizado do fornecedor q_S não é inferior ao nível de qualidade original q'_S , otimiza-se o custo de qualidade do fornecedor chave S para maximizar o valor de qualidade QV_S e qualidade de desenvolvimento. O modelo de otimização de custos, a função objetivo e as restrições do modelo são:

$$\begin{aligned} & \max Z = QV_S \\ \text{s.t. } & L_S = g(A_S), g'(A_S) \leq 0, g''(A_S) \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$q_S = r(A_S), r'(A_S) \geq 0, r''(A_S) \leq 0; \quad (14)$$

$$C_S = M_S + A_S + L_S, QV_S = \frac{q_S}{C_S}; \quad (15)$$

$$0 \leq q'_S \leq q_S \leq 1, M_S, A_S, L_S \geq 0 \quad (16)$$

De acordo com diferentes formas de $L_S = g(A_S)$ e $q_S = r(A_S)$, o modelo de otimização tem diferentes formas e diferentes soluções. Neste artigo, $L_S = g(A_S)$ e $q_S = r(A_S)$, é uma função linear por partes (como mostrado na Figura 4 e Figura 5).

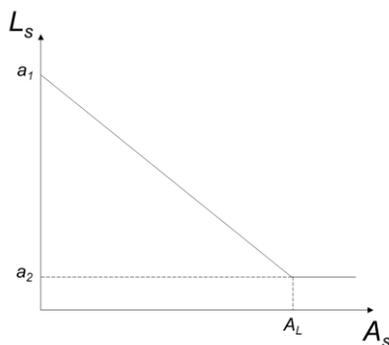


Figura 4 Função linear de custo de perda de qualidade

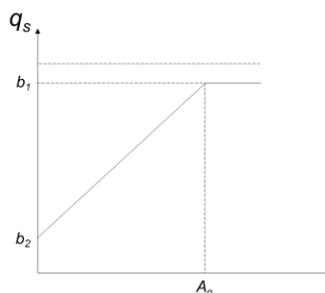


Figura 5. Função linear por partes de nível de qualidade
 Fonte: Elaboração própria.

Tomando $A_L \geq A_q$ como um exemplo para discutir o método de solução do modelo de otimização de custo de qualidade, tem-se:

$$L_S = \begin{cases} k_1 A_S + a_1, & 0 < A_S < A_L; \\ a_2, & A_S \geq A_L. \end{cases} \quad (17)$$

$$q_S = \begin{cases} k_2 A_S + b_2, & 0 < A_S < A_q; \\ b_1, & A_S \geq A_q. \end{cases} \quad (18)$$

Em que:

$$k_1 = \frac{a_2 - a_1}{A_L}, A_L \geq 0, a_1 > a_2 \geq 0; k_2 = \frac{b_1 - b_2}{A_q}, A_q \geq 0, 0 \leq b_2 \leq 1.$$

Após a derivação e solução do modelo, pode-se ver que a solução ótima possui as três situações a seguir:

A) Quando $A_S \leq A_q$:

- Quando $k_1 \in (-\infty, -1]$, ou $k_1 \in (-1, 0)$ e $b_2 \leq 0$;
- Quando, a solução ótima existe e é única, $A_S^* = A_q$, $QV_S^* = 0$
- Quando, a solução ótima existe e é única, $A_S^* = A_S$.

B) Quando $A_q \leq A_S \leq A_L$:

- Quando $k_1 \in (-\infty, -1]$, a solução ótima existe e é única, $A_S^* = A_L$,
- Quando $k_1 \in (-1, 0)$, a solução ótima existe e é única, $A_S^* = A_q$,

C) Quando $A_S \geq A_L$, a solução ótima existe e é única, $A_S^* = A_L$,

4 ESTUDO DE CASO

A gestão da qualidade em projetos de construção tem sido cada vez mais valorizada como um meio eficaz de avaliar o sucesso de programas de qualidade. A aplicação do conceito de custo da qualidade originou-se na indústria manufatureira nas décadas de 1950 e desde então ganhou popularidade na área de construção, à medida que a ênfase na melhoria da qualidade aumentou desde os anos 1980 (Aoieong, Tang & Ahmed, 2002). Abordagens sistemáticas são necessárias para medir o custo de qualidade na construção devido à complexidade das atividades envolvidas em projetos típicos.

A questão de equilibrar qualidade e custos em projetos de construção levou a abordagens dinâmicas, que consideram os custos de qualidade como um sistema complexo. Esse sistema foi modelado usando a abordagem de dinâmica de sistemas, demonstrando que aumentar as horas de treinamento e contratar trabalhadores experientes pode reduzir os custos de falha e aumentar os custos de prevenção, resultando em menor custos de qualidade (Shafiei et al., 2023).

Outro estudo utilizou redes neurais para avaliar o custo de qualidade em projetos de construção. Identificou fatores que afetam esse custo e desenvolveu um modelo para avaliação (Tawfek, Mohammed & Abdel Razek, 2012).

Enquanto isso, a análise de métodos de avaliação do fator de qualidade em problemas de equilíbrio tempo-custo em projetos de construção classificou esses métodos em quatro categorias diferentes (Banihashemi & Shahraki, 2020).

Finalmente, a minimização do custo de má qualidade (COPQ) em projetos de construção se tornou uma preocupação importante. Mahmood (2021) identificou fatores críticos de sucesso em diferentes áreas de gerenciamento de projetos que podem reduzir os custos de qualidade. O foco na fase de planejamento como a mais crítica destaca a importância de evitar revisões e retrabalhos durante a execução do projeto, mantendo os custos de qualidade no nível mais baixo possível (Mahmood, 2021).

Percebe-se que a área de projetos de construção tem sido um dos focos do estudo de custos de qualidade, sendo as construções consideradas um produto complexo e com a interação de diversos fornecedores. A construção de um prédio comercial, por exemplo, é uma aplicação típica do modelo "principal fabricante-fornecedor". Por exemplo, o principal fabricante é a construtora que executa o projeto, tendo fornecedores de diversos níveis.

Para validar o modelo GERT de otimização proposto, o estudo de caso baseou-se no exemplo de uma construtora de prédios comerciais que possui 5 níveis de fornecedores, conforme Figura 6. São dois fornecedores primários, três fornecedores de segundo nível e dois fornecedores de terceiro nível, um de quarto e um de quinto nível. O relacionamento é mostrado na Figura 6, em que o nó 1 é um nó de origem virtual.

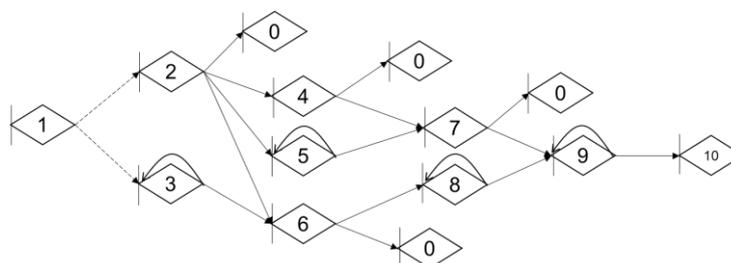


Figura 6 Grande rede GERT fornecedora de aeronaves civis
Fonte: Elaboração própria

De acordo com a experiência em pesquisa e desenvolvimento e os dados estatísticos de fornecedores em todos os níveis e do fabricante principal, obtém-se os parâmetros relacionados à rede que são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1

Parâmetros de atividades de rede de grandes fornecedores de desenvolvimento de construção de prédios comerciais

(i, j)	P_{ij}	M_{ij}	A_{ij}	L_{ij}
(1, 2)	0,5	0	0	0
(1, 3)	0,5	0	0	0
(2, 0)	N (0,1, 0,04)	0,1	N (0,2, 0,01)	N (0,5, 0,06)
(2, 4)	N (0,3, 0,03)	0,4	N (0,5, 0,02)	N (0,3, 0,05)
(2, 5)	N (0,4, 0,05)	0,3	N (0,6, 0,03)	N (0,2, 0,03)
(2, 6)	N (0,2, 0,01)	0,5	N (0,3, 0,02)	N (0,4, 0,04)
(3, 3)	N (0,3, 0,07)	0,4	N (0,3, 0,01)	N (0,3, 0,05)
(3, 6)	N (0,7, 0,04)	0,7	N (0,7, 0,06)	N (0,6, 0,07)
(4, 0)	N (0,1, 0,03)	0,2	N (0,3, 0,02)	N (0,7, 0,04)
(4, 7)	N (0,9, 0,08)	0,5	N (0,8, 0,05)	N (0,2, 0,03)
(5, 5)	N (0,2, 0,03)	0,2	N (0,3, 0,06)	N (0,5, 0,06)
(5, 7)	N (0,8, 0,05)	0,9	N (0,9, 0,08)	N (0,4, 0,04)
(6, 0)	N (0,4, 0,02)	0,3	N (0,4, 0,07)	N (0,6, 0,02)
(6, 8)	N (0,6, 0,03)	0,6	N (0,7, 0,04)	N (0,5, 0,03)
(7, 0)	N (0,3, 0,04)	0,3	N (0,4, 0,07)	N (0,6, 0,03)
(7, 9)	N (0,7, 0,02)	0,7	N (0,9, 0,05)	N (0,6, 0,02)
(8, 8)	N (0,2, 0,03)	0,4	N (0,4, 0,04)	N (0,7, 0,04)
(8, 9)	N (0,8, 0,03)	0,6	N (0,8, 0,03)	N (0,4, 0,06)
(9, 9)	N (0,1, 0,02)	0,4	N (0,3, 0,05)	N (0,4, 0,07)
(9, 10)	N (0,9, 0,02)	0,8	N (0,9, 0,06)	N (0,5, 0,02)

Fonte: Elaboração própria

De acordo com o modelo GERT de valor de qualidade de produto complexo, detalhado na seção anterior e a partir dos dados da Tabela 1, utilizou-se o software Matlab para calcular $P_{(1, 10)} = 0,5945$, $E(C) = 8,3043$, e o nível de valor de qualidade da rede de desenvolvimento que foi de 0,0716.

De acordo com o método de otimização de custos de qualidade da cadeia de suprimentos de produtos complexos, os fornecedores-chave na rede são identificados primeiro e o nível de valor de qualidade de cada fornecedor é calculado conforme mostrado na Tabela 2. Portanto, o fornecedor-chave no fornecedor de primeiro nível é o Fornecedor 2, o fornecedor-chave dos fornecedores de segundo nível é o Fornecedor 6 e o fornecedor-chave dos fornecedores de terceiro nível é o Fornecedor 7.

Tabela 2

Nível de valor de qualidade do fornecedor

QV ₂	QV ₃	QV ₄	QV ₅	QV ₆	QV ₇	QV ₈	QV ₉
0,21	0,33	0,33	0,31	0,17	0,20	0,30	0,30

Fonte: Elaboração própria.

Em seguida, otimiza-se o custo de qualidade dos principais fornecedores 2, 6 e 7. Os parâmetros relevantes dos fornecedores 2, 6 e 7 antes e depois da otimização são mostrados na Tabela 3. Após a otimização, os níveis de valor de qualidade dos fornecedores 2, 6, e 7 são aumentados respectivamente em 4,7%, 58,82% e 30%. Substituindo os dados otimizados no modelo GERT original e usando o software Matlab para calcular, $P_{(1, 10)} = 0,8040$, $E(C) = 8,5412$ e o nível de valor de qualidade da rede desenvolvida que foi de 0,0941, que é 31,42% maior do que antes da otimização.

Tabela 3

Principais Parâmetros Relacionados ao Fornecedor

Parâmetro	Fornecedor 2	Fornecedor 6	Fornecedor 7
k_1	-1	-1	-1
k_2	0,5	0,4	0,5
um_1	3	2,2	2,5
um_2	0,7	0,5	0,6
$b1_$	0,95	0,8	0,9
b_2	0,1	0,16	0,05
A_L	2,3	1,7	1,9
$Q_$	1,7	1,6	1,7
$AS_$	1,6	1,1	1,3
UM_s^*	1,7	1,6	1,7
$QUR_$	0,21	0,17	0,20
QV_s^*	0,22	0,27	0,26

Fonte: Elaboração própria.

Desta forma percebe-se que o modelo proposto conseguiu melhorar 31,42% o nível de qualidade da rede desenvolvida para a construção de prédios comerciais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto do modelo "principal fabricante-fornecedor", a otimização dos custos de qualidade na cadeia de suprimentos desempenha um papel crucial no controle de qualidade de produtos complexos. No entanto, os métodos convencionais de otimização de custos de qualidade, frequentemente empregados em âmbito interno, não abrangem o valor de qualidade associado aos produtos complexos, o que limita sua aplicabilidade completa ao cenário de cadeia de suprimentos de produtos. Com o intuito de abordar essa lacuna, este estudo introduz inicialmente o conceito de "valor de qualidade de produto complexo", fundamentado na abordagem abrangente de desenvolvimento e no nível de qualidade. Adicionalmente, analisa o mecanismo de formação desse valor, centrado na interconexão da rede de fornecedores. A construção subsequente do modelo GERT de valor de qualidade de produto complexo proporciona um quadro de referência inovador, enquanto considera os níveis de valor de qualidade dos fornecedores e propõe um método de otimização dos custos de qualidade na cadeia de suprimentos de produtos complexos.

A abordagem delineada por esse modelo oferece uma solução e metodologia inovadoras para enfrentar o desafio de otimização de custos na qualidade de produtos complexos em contextos de cadeia de suprimentos. Mediante a aplicação desse modelo, é notável a necessidade premente de contemplar a otimização dos custos de qualidade em âmbito de cadeia de suprimentos. O principal fabricante deve, de forma contínua, analisar minuciosamente os produtos e estruturas de custo de qualidade de cada fornecedor em distintos níveis, considerando de maneira específica os níveis de valor de qualidade associados. Identificar fornecedores-chave que apresentam fragilidades nos seus valores de qualidade e otimizar os custos de qualidade de maneira direcionada emergem como estratégias eficazes para aprimorar eficazmente a gestão da qualidade. Ao paralelo, a redução da ocorrência de produtos irrecuperáveis na cadeia de suprimentos e a orientação dos fornecedores para incrementar a confiabilidade dos produtos através de melhorias tecnológicas e de manutenibilidade constituem vias de elevação do patamar de valor de qualidade da rede de fornecedores, ao mesmo tempo em que economizam custos de desenvolvimento.

Prosseguindo, futuras pesquisas podem direcionar-se a ampliar o âmbito do método de solução do modelo de otimização, abrangendo diversas relações de função de custo de qualidade. Igualmente, a aplicação do método em situações práticas demanda uma consideração subsequente. Essa abordagem inovadora e voltada para a cadeia de suprimentos contribui, portanto, para a compreensão mais aprofundada e a resolução efetiva do problema de otimização de custos na qualidade de produtos complexos em ambientes complexos de cadeia de suprimentos.

REFERÊNCIAS

- Aoieong, R. T., Tang, S. L., & Ahmed, S. M. (2002). A process approach in measuring quality costs of construction projects: model development. *Construction management & economics*, 20(2), 179-192.
- Banihashemi, S. A., & Shahraki, A. (2020). Analysis of Quality Factor Evaluation Methods in Optimization Time-Cost Trade-off Problem in Construction Projects. *Civil Infrastructure Researches*, 6(1), 153-173.
- Castillo-Villar, K. K., Smith, N. R., & Simonton, J. L. (2012) A model for supply chain design considering the cost of quality. *Applied Mathematical Modelling*, 36(12): 5920-5935.
- Chen, H. Z., Fang, Z. G., & Liu, S. F. (2014) Research on the optimal cost-sharing incentive of collaborative cooperation between the main manufacturer and supplier of complex products. *Chinese Journal of Management Science*, 22(9): 98-105.)
- Chen, Z. D. (2015) Case studies on the impact of complex product system characteristics on risk consequences. *Journal of Management*, 12(9): 1263-1272.
- Franca, R. B., Jones E. C., & Richards, C. N. (2010) Multi-objective stochastic supply chain modeling to evaluate tradeoffs between profit and quality. *International Journal of Production Economics*, 127(2SI): 292-299.
- Hsieh, C. C., & Liu, Y. T. (2010) Quality investment and inspection policy in a supplier-manufacturer supply chain. *European Journal of Operational Research*, 202(3): 717-729.
- Jin, S., Zheng. C., & Yu, K. G. (2010) Tolerance design optimization on cost quality trade off using the Shapley value method. *Journal of Manufacturing Systems*, 29(4): 142-150.

- Juran, J. M. (1951). *Juran's quality handbook*.
- Khataie, A. H., & Bulgak, A. A. (2013) A cost of quality decision support model for lean manufacturing: Activity-based costing application. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 30(7): 751-764.
- Liu, Y., Fang, Z. G., & Liu, S. F. (2011) Study on the problem of complex product key quality diagnosis and detection based on supplier GERT model. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 25(2): 212-219.
- Liu, Y., Hipple, K. W., & Fang, Z. G. (2012) Hierarchical decision model for quality control schemes in complex product supply chain. *Control and Decision*, 27(11): 1685-1693.
- Mahmood, S. (2021). Identification of critical success factors for minimization of cost of poor quality from the construction projects. *American Journal of Science, Engineering and Technology*, 6(3), 84.
- Naidu, N. V. R. (2008) Mathematical model for quality cost optimization. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(6): 811-815.
- Pan, Y. H., & Xiao, J. (2015) Based on the quality cost model of customer satisfaction. *Systems Engineering*, 33(1): 74-80.
- Pi S L. (2010) Quality value flow and its application. *Technology Economics*, 29(8): 122-130.
- Shafiei, I., Eshtehardian, E., Nasirzadeh, F., & Arabi, S. (2023). Dynamic modeling to reduce the cost of quality in construction projects. *International Journal of Construction Management*, 23(1), 24-37.
- Shang, S. S., & You, J. X. (2009) Quality cost control model based on fuzzy neural network. *Soft Science*, 23(12): 39-44.
- Tawfek, H. S., Mohammed, H. E. D. H., & Abdel Razek, M. E. (2012). Assessment of the expected cost of quality (COQ) in construction projects in Egypt using artificial neural network model. *HBRC journal*, 8(2), 132-143.
- Thun, J. H., & Hoenig, D. (2011) An empirical analysis of supply chain risk management in the German automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 131(1SI): 242-249.
- Vanichchinda A., & Igel, B. (2011) The impact of total quality management on supply chain management and firm's supply performance. *International Journal of Production Research*, 49(11): 3405-3424.
- Wang, D. P., Zhao, C., & Cheng, Y. P. (2018) Research on supply chain coordination considering quality control and loss avoidance. *Control and Decision*, 33(12): 2295-2304.
- Wang, Y. M., Zhao, D. Z., & Huang, J. (2009) Quality cost control model of supply chain based on risk transfer. *Research on Science and Technology Management*, 29(3): 155-157.
- Xu, L., Fang, Z. G., & Liu, S. F. (2013) Complex product supply chain management optimization based on design structure matrix. *Operations Research and Management Science*, 22(1): 106-111.
- Zeng, J., Phan, C. A., & Matsui, Y. (2013) Supply chain quality management practices and performance: An empirical study. *Operation Management Research*, 6(1 / 2): 19-31.
- Zhang, L. R., Zhang, X. L., & Zhao, G. (2016) Collaborative replenishment decision based on Supply-hub under uncertain demand. *Systems Engineering*, 34(10): 98-107. Zhang, Y., & Wang, S. Y. (2011) Analysis of quality cost review model based on wholesale price contract. *System Engineering — Theory & Practice*, 31(8): 1481-1488.)