



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**RESUMO EMPRESARIAL DA DISSERTAÇÃO:**

**MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO NO MÉTODO FITRADEOFF PARA  
DEFINIÇÃO DE TEMPOS DE INSPEÇÃO EM UM SISTEMA SUJEITO A  
INSPEÇÕES IMPERFEITAS**

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

**AUGUSTO JOSÉ DA SILVA RODRIGUES**

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.

Recife  
2020

## 1. DADOS PESSOAIS

Esta seção apresenta os dados pessoais do aluno e do professor orientador.

### 1.1 Dados do discente

*Augusto José da Silva Rodrigues*, é Mestre em Engenharia de Produção, com ênfase em Pesquisa Operacional, pela Universidade Federal de Pernambuco (PPGEP/UFPE), Bacharel em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG/CDSA) e Técnico em Segurança do Trabalho pela ETE Almirante Soares Dutra (ETEASD). Seus interesses científicos incluem os temas: Engenharia de Manutenção e Confiabilidade, Decisão Multicritério, Higiene e Segurança do Trabalho, Simulação e Otimização de Processos Produtivos, Informática (Programação em Python e Delphi) e Gestão da Qualidade. Atualmente é membro do Grupo de pesquisa em Risco e Análise de Decisão em Operações e Manutenção (RANDOM/UFPE).

- **E-mail:** [augustojrodrigues@gmail.com](mailto:augustojrodrigues@gmail.com).
- **Currículo lattes:** <http://lattes.cnpq.br/2747669611058510>

### 1.2 Dados do docente (orientador)

*Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante*, é professor Associado em Pesquisa Operacional, Engenharia de Manutenção e Logística na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), no departamento de Engenharia de Produção. Obteve o doutorado em 2005, pela UFPE com a tese “Modelagem de Decisão Multicritério no Planejamento da Manutenção Abordando Problemáticas de Escolha e Classificação”. Realizou o Pós-Doutorado na University of Salford (UK). É bolsista Produtividade 1C pelo CNPq. Publicou diversos artigos em periódicos internacionais em diferentes temáticas, tais como: Políticas de Manutenção; Modelagem em Manutenção, Risco, Confiabilidade e Segurança; Modelos de Garantia; Gestão de Armazéns; Modelos Multicritério de Apoio a Decisão; Manutenção para Sistemas de Proteção; Impacto da Qualidade das Ações de Manutenção no desempenho de sistemas, entre outros temas. Cristiano Cavalcante é *Fellow* do Instituto de Matemática e suas Aplicações (IMA) do Reino Unido (<https://ima.org.uk/>), é Membro Sênior do IEEE (<https://www.ieee.org/>) e membro do INFORMS (<https://www.informs.org/>). Além disso, é o líder do RANDOM (Grupo de pesquisa em Risco e Análise de Decisão em Operações e Manutenção) (<http://random.org.br/>) e membro do CDSID (Centro de Desenvolvimento em Sistemas de Informação e Decisão) (<http://www.cdsid.org.br>). Atualmente o professor Cristiano Cavalcante coordena dois projetos com Instituições Internacionais (1) CAPES/PRINT-ep “Avanços e Inovação em Engenharia de

Produção” que envolve mais 10 instituições Internacionais e (2) CAPES/COFECUB “Desenvolvimento de uma abordagem integrada de manutenção para a Indústria 4.0”, em parceria com a universidade de Lorraine.

- **E-mail:** cristianogesm@gmail.com.
- **Currículo lattes:** <http://lattes.cnpq.br/6312739422908628>

## **2. BANCA EXAMINADORA**

A comissão examinadora presente na defesa que ocorreu em 19 de fevereiro de 2020, foi composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro.

- Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante (Orientador) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE);
- Dra. Caroline Maria de Miranda Mota (Examinadora Interna) - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE);
- Dra. Mischel Carmen Neyra Belderrain (Examinadora Externa) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

### 3. RESUMO

A presente pesquisa apresenta um modelo multicritério para o estabelecimento de uma política de manutenção, operacionalizada em termos de atividades de inspeção, voltada para um sistema de proteção (válvula de bloqueio). Sua grande motivação deriva do fato da demanda por gás natural estar passando por um amplo crescimento, promovendo cada vez mais a utilização e construção de novos gasodutos. Como a procura por esse combustível envolve diversas organizações, variando de grandes indústrias a condomínios residenciais, uma parcela razoável de linhas de dutos está inserida em áreas habitadas ou com possibilidade de habitação, aumentando ainda mais os riscos de acidentes e incrementando as possibilidades de se tornar um desastre. Com isso, uma correta política de manutenção assume um papel estratégico para a empresa responsável, sendo necessário um embasamento matemático e científico, baseados nos fatos realísticos, para a correta tomada de decisão. Neste sentido, este trabalho propõe um novo modelo de inspeção baseado no *delay time* e sob uma perspectiva multicritério, onde não apenas o custo das inspeções é modelado, como também o tempo de inatividade (*downtime*) das válvulas e o número de equipes dedicadas a manutenibilidade, que são fatores críticos atrelados as atividades de manutenção nos gasodutos. Dentre as principais contribuições desta dissertação, destacam-se: o desenvolvimento do modelo para válvulas de gasodutos sujeito a inspeções imperfeitas (falso negativos) e a aplicação do método multicritério FITradeoff para tratar os conflitos entre os critérios de avaliação, considerando uma problemática de ordenação, chegando então a melhor política de manutenção a ser adotada, de acordo com as preferências do decisor.

**Palavras-chave:** *Delay time*. FITradeoff. Inspeções imperfeitas. Política de manutenção.

#### **4. ABSTRACT**

This research presents a multicriteria model for the establishment of a maintenance policy, operationalized in terms of inspection activities, focused on a protection system (shutoff valve). Its great motivation derives from the fact that the demand for natural gas has been undergoing a large growth, increasingly promoting the use and construction of new pipelines. As demand for this fuel involves many organizations, from large industries to residential condominiums, a reasonable portion of pipeline lines are in inhabited areas or in places with possibility of housing, further increasing risks of accidents and the chances of becoming a disaster. Thus, a correct maintenance policy assumes a strategic role for the responsible company, showing the necessity of a mathematical and scientific study, based on real facts, for the correct decision making. In this sense, this work proposes a new inspection model based on the delay time and in terms of a multicriteria perspective, where not only the cost of inspections is modeled, but also valves downtime and the number of teams dedicated to maintainability, which are critical factors linked to pipeline maintenance activities. Among the main contributions of this dissertation, one may highlight: the model development for pipeline valves subject to imperfect inspections (false negatives) and the application of the FITradeoff multicriteria method to deal with conflicts between criteria evaluation, considering the ranking problematic, according to the preferences of the decision maker.

**Keywords:** Delay time. FITradeoff. Imperfect Inspections. Maintenance Policy.

## 5. CONTEXTUALIZAÇÃO E TEMA

Antigamente, a manutenção era considerada um mal necessário à organização, aparecendo dentro das empresas como mais um componente de despesas totais. Como consequência das transformações nesse setor, a função manutenção também evoluiu, levando a alta administração a reconhecer que ter uma estratégia de manutenção bem pensada, juntamente com uma implementação cuidadosa, pode realmente ter um impacto financeiro significativo (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008).

Hoje, é perceptível que boas estratégias de manutenção desempenham um papel importante na eficácia dos processos industriais, evitando ações desnecessárias ou ineficazes nas organizações, através da agregação de atividades que contribuem efetivamente para a disponibilidade dos equipamentos, para a redução dos custos das empresas e para a atenuação dos impactos ambientais. Singh, Kumar e Naikan (2019), por exemplo, destacam o quão drástico para a sustentabilidade pode ser a falha em um motor de indução, que pode aumentar não apenas o consumo de energia, mas a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido na atmosfera.

Consequentemente, devido as vantagens supracitadas, houve um crescimento na literatura sobre otimização de manutenção, através de diversas publicações sobre técnicas e modelos matemáticos, que, segundo Driessen, Peng e Van Houtum (2017), são normalmente usados para apoiar certos objetivos, estabelecendo as melhores políticas de manutenção. Por sua vez, esses objetivos podem variar, conforme as prioridades competitivas da empresa.

Tais aplicações sobre as políticas de manutenção são diversas. Alguns trabalhos tratam a possibilidade de que as inspeções possam ser imperfeitas (BERRADE; SCARF; CAVALCANTE, 2015; BERRADE; SCARF; CAVALCANTE, 2017). Flage (2014), considerada o cenário de que as próprias inspeções induzam falhas. Berrade, Scarf e Cavalcante (2018) avaliam algumas circunstâncias em que a falha de um dispositivo se dá influenciada por um defeito induzido por outro dispositivo. Mais recentemente, Yang *et al.* (2019) investigaram uma política de manutenção preventiva para um sistema de componente único, considerando não apenas reparo imperfeito, mais também substituição adiada.

Dentro dessa conjuntura, nos últimos anos foi dada uma atenção significativa a ações que minimizem impactos negativos ocasionados por falhas em gasodutos de distribuição de gás natural, muitas vezes considerando redução de custos através de melhores políticas de manutenção (ZHANG; ZHOU, 2014; LIU *et al.*, 2018; BAHOOTORODDY *et al.*, 2019). De fato, é nítido que falhas nesses tipos de sistemas podem causar consequências críticas para a sociedade e o meio ambiente, além de enormes perdas econômicas.

À luz dessas discussões, tendo em vista que tubulações são infraestruturas vitais para a transmissão de grandes quantidades de gás natural, esse estudo propõe uma política de manutenção para trechos de gasodutos, mais especificamente aplicada no contexto de inspeções de válvulas de bloqueio inseridas nos dutos, fundamentado no pressuposto de que uma correta política de manutenção assume um papel estratégico e valioso para as empresas.



## 6. PROBLEMÁTICA

Os gasodutos são sistemas de tubulações formados por vários componentes que precisam estar sempre disponíveis e funcionando em perfeito estado. Quando um gasoduto é instalado em uma região, um perigo é introduzido e na maioria das vezes os cidadãos das áreas periféricas vivem diariamente com o mínimo de conhecimento sobre os perigos (ZHAO; HAN; LUO, 2018). Em outras ocasiões, gera-se riscos que são aceitos pela sociedade devido aos benefícios que podem ser proporcionados pela instalação desses gasodutos, bem como a garantia do controle desses riscos.

Em consonância com o aumento de sistemas de tubulações, ocorreram numerosos acidentes com gás natural. Em 2004, o vazamento de gás natural levou a uma explosão em um distrito da cidade de Luzhou, na China, causando 5 mortes e 35 ferimentos graves. No mesmo ano, na província de Shenyang, cidade de Liaoning, também testemunhou uma grande falha de energia devido a vazamentos de gás natural e incêndios subsequentes, que afetaram a produção e a vida dos residentes locais (MA; CHENG; LI, 2013). Em 2009, uma explosão causada por vazamento de gás induziu a maior conflagração em Moscou (Rússia) desde a Segunda Guerra Mundial (HAN; WENG, 2011).

Diante do exposto, frisa-se que, ações de manutenção precisam ser adequadamente estabelecidas e operacionalizadas para assegurar não só o máximo de segurança contra possíveis falhas em gasodutos, mas principalmente a prontidão dos equipamentos de proteção, permitindo que esses operem perfeitamente quando as falhas acontecerem. Muitas vezes, conforme o caso de estudo de Zhao e Song (2016), gasodutos operam por longos anos sem inspeções periódicas, possibilitando que os defeitos se propaguem e a falha surja.

Vale salientar que, apesar dos recentes avanços sobre políticas de manutenção, muitos dos modelos de manutenção buscam estabelecer ações que otimizem apenas um critério, como custo (WANG, 2013) ou *downtime* (NAZEMI; SHAHANAGHI, 2015). Ferreira, De Almeida e Cavalcante (2009) enaltecem a importância de os modelos permitirem que o tomador de decisão observe simultaneamente mais de um aspecto. Nesse princípio, este trabalho busca agregar essa contribuição sob uma perspectiva multicritério.

Por fim, há uma carência de considerar nos modelos matemáticos de manutenção a possibilidade de ocorrer erros de julgamento, como os falsos negativos. Berrade, Scarf e Cavalcante (2013) detalham que existe uma presença de um falso negativo quando durante uma inspeção não é identificado que o componente está falho, ocorrendo um erro de afirmação por parte do mantenedor.

## 7. OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### 7.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é desenvolver um modelo de inspeção considerando inspeções imperfeitas (falso negativo) para válvulas de gasodutos, baseando-se no *delay time* e sob uma perspectiva multicritério, fazendo uso do método FITradeoff para tratar conflitos entre os critérios de avaliação.

### 7.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Realizar uma revisão bibliográfica acerca dos conceitos fundamentais de manutenção e suas políticas, bem como sobre os métodos *delay time* e FITradeoff;
- Investigar as particularidades da manutenção em sistemas de prestação de serviços e sobre os aspectos relevantes em manutenção de gasodutos;
- Especificar quais são os critérios relevantes para serem modelados;
- Realizar a modelagem matemática incorporando inspeções imperfeitas;
- Construir um modelo multicritério para apoiar a definição da política de manutenção, considerando uma problemática de ordenação;
- Realizar uma aplicação numérica do modelo desenvolvido;
- Verificar a consistência do modelo através de uma análise de sensibilidade.

## 8. METODOLOGIA

No que concerne as etapas fundamentais para desenvolver o trabalho, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica acerca das evoluções dos conceitos fundamentais de manutenção, bem como sobre o método *delay time* e o FITradeoff. Essa etapa da pesquisa foi essencial pelo fato de que, além de adquirir conceitos fundamentais para o estudo, foi possível identificar lacunas na literatura, o que permite um direcionamento melhor do trabalho.

Em sequência, após investigar as particularidades da manutenção em sistemas de prestação de serviços e os aspectos relevantes na manutenção de gasodutos, foram especificados os critérios relevantes para serem modelados. Essa etapa permite que, não apenas sejam levados em consideração os objetivos do decisor (representados por critérios), mas que sejam determinados critérios que condizam com a realidade.

Dando continuidade, optou-se por escolher o modelo *delay time* para realizar as modelagens, pelo fato de representar, conforme revisão da literatura, uma ótima ferramenta para modelagem de manutenção. Para resolução no modelo multicritério de apoio à decisão, foi utilizado o FITradeoff. A escolha pelo método justifica-se tanto porque buscou-se estudar o comportamento do modelo mediante uma racionalidade compensatória por parte do decisor, quanto pelos benefícios relatados por Roselli, Frej e De Almeida (2018), por ser um método flexível, o mesmo apresenta informações que podem ser visualizadas graficamente – a partir de suas alternativas potencialmente ótimas – e em qualquer parte do processo o decisor pode escolher uma alternativa. Isso agiliza o processo de tomada de decisão.

Posteriormente, foram desenvolvidos modelos matemáticos que incorporem inspeções imperfeitas bem como construído um modelo multicritério que apoie a definição da política de manutenção. Assim, a partir da construção de uma matriz de consequências mediante os resultados obtidos com as equações modeladas, foi determinado um tempo ideal de inspeção. Por fim, uma análise de sensibilidade é executada para verificar a robustez do modelo.

## 9. RESULTADOS OBTIDOS

A dissertação colaborou sob o ponto de vista acadêmico à medida em que estruturou e realizou uma revisão bibliográfica acerca dos conceitos fundamentais de manutenção e suas políticas, bem como sobre os métodos *Delay Time* e FITradeoff, algo fundamental para subsidiar futuras pesquisas.

Além do mais, a investigação sobre as particularidades da manutenção em sistemas de prestação de serviços também é relevante, pois enfatiza a necessidade de modelos mais apropriados para o contexto de serviço, já que essa área ainda se encontra um pouco mais defasada em relação à realidade industrial, no que diz respeito a modelos de manutenção. O trabalho apresenta mais duas colaborações significativas: apresentou o modelo *delay time* para contextos em que podem ocorrer erros de julgamento durante as inspeções (falsos negativos) e verificou a efetividade da agregação do FITradeoff com o *delay time*, considerando uma problemática de ordenação.

Com esse intuito, particularidades do sistema foram amplamente discutidas, e assim, um modelo multicritério foi proposto dentro do contexto de manutenção de gasodutos, com o objetivo de alcançar a melhor política de inspeções das válvulas de bloqueio, levando em consideração múltiplos critérios, neste caso em específico: custo, *downtime* e o número de membros presente na equipe de manutenção, dedicados a realizarem ações de inspeção, reparo e correção.

O sistema de distribuição de gás natural foi utilizado para ilustrar a aplicabilidade do modelo e sua eficiência, chegando assim a resultados bastante satisfatórios, observando a grande importância da utilização de modelos multicritério para a escolha da melhor política de manutenção dentro do contexto de serviços, como já é aceito na produção de bens. Com a metodologia empregada, busca-se não mais uma solução ótima, posto que devido à existência de conflitos entre os objetivos, não se tem a possibilidade de se obter a otimização de todos os critérios simultaneamente.

Portanto, pôde-se alcançar alternativas com desempenhos mais equilibrados em termos dos critérios custo e *downtime*, juntamente com os membros atuantes na equipe de manutenibilidade, quando comparado com modelos que levam em conta um único critério. Assim, mostra-se que, na distribuição e fornecimento de gás, ou seja, na prestação do serviço, operações de manutenção não podem ser baseadas em apenas um único fator, pois se estaria beneficiando um aspecto dentro do sistema em detrimento de outro. Por exemplo, levando em consideração apenas o fator custo, poder-se-ia obter graves consequências com relação ao

*downtime* do sistema, pois, no intuito de minimizar o custo, menos inspeções são realizadas e falhas tendem a surgir, logo, a medida tomada seria totalmente ineficiente e negativa para os resultados globais.

## REFERÊNCIAS

- BAHOOTOROODY, A.; ABAEI, M. M.; ARZAGHI, E.; BAHOOOTOROODY, F.; DE CARLO, F.; ABBASSI, R. Multi-level optimization of maintenance plan for natural gas system exposed to deterioration process. *Journal of Hazardous Materials*, v. 362, p. 412-423, 2019.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A.V. Modelling imperfect inspection over a finite horizon. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 111, p. 18-29, 2013.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A.V. Some insights into the effect of maintenance quality for a protection system. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 64, n. 2, p. 661-672, 2015.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C.A.V. A study of postponed replacement in a delay time model. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 168, p. 70-79, 2017.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C.A.V. Conditional inspection and maintenance of a system with two interacting components. *European Journal of Operational Research*, v. 268, n. 2, p. 533-544, 2018.
- DRIESSEN, J. P. C.; PENG, Hao; VAN HOUTUM, G. J. Maintenance optimization under non-constant probabilities of imperfect inspections. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 165, p. 115-123, 2017.
- FERREIRA, R. J. P.; DE ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C. A. V. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 94, n. 5, p. 905-912, 2009.
- FLAGE, R. A delay time model with imperfect and failure-inducing inspections. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 124, p. 1-12, 2014.
- HAN, Z. Y.; WENG, W. G. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of hazardous materials*, v. 189, n. 1-2, p. 509-518, 2011.
- LIU, X.; ZHENG, J.; FU, J.; JI, J.; CHEN, G. Multi-level optimization of maintenance plan for natural gas pipeline systems subject to external corrosion. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 50, p. 64-73, 2018.
- MA, L.; CHENG, L.; LI, M. Quantitative risk analysis of urban natural gas pipeline networks using geographical information systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 26, n. 6, p. 1183-1192, 2013.
- NAZEMI, E.; SHAHANAGHI, K. Developing an inspection optimization model based on the delay-time concept. *Journal of Industrial Engineering*, v. 2015, 2015.
- PINTELON, L.; PARODI-HERZ, A. Maintenance: an evolutionary perspective. In: *Complex system maintenance handbook*. Springer, London, 2008. p. 21-48.
- ROSELLI, L. R. P.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T. Neuroscience experiment for graphical visualization in the FITradeoff decision support system. In: *International Conference on Group Decision and Negotiation*. Springer, Cham, 2018. p. 56-69.
- SINGH, G.; KUMAR, T. C. A.; NAIKAN, V. N. A. Efficiency monitoring as a strategy for cost effective maintenance of induction motors for minimizing carbon emission and energy consumption. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 184, p. 193-201, 2019.

WANG, W. Models of inspection, routine service, and replacement for a serviceable one-component system. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 116, p. 57-63, 2013.

YANG, L.; YE, Z. S.; LEE, C. G.; YANG, S. F.; PENG, R. A two-phase preventive maintenance policy considering imperfect repair and postponed replacement. *European Journal of Operational Research*, v. 274, n. 3, p. 966-977, 2019.

ZHANG, S.; ZHOU, W. Cost-based optimal maintenance decisions for corroding natural gas pipelines based on stochastic degradation models. *Engineering Structures*, v. 74, p. 74-85, 2014.

ZHAO, Q.; HAN, L. D.; LUO, N. A proposed semi-quantitative framework for comprehensive risk assessment of urban hazard installations considering rescue accessibility and evacuation vulnerability. *Safety science*, v. 110, p. 192-203, 2018.

ZHAO, Y.; SONG, M. Failure analysis of a natural gas pipeline. *Engineering Failure Analysis*, v. 63, p. 61-71, 2016.