

Situação atual e perspectivas futuras da manutenção baseada na condição em uma unidade fabril petroquímica: um estudo de caso

Felipe Gabriel Kuhn Soares

Ricardo Cardoso

Francis Edgar Stathi

Mestrandos Profissionais em Gestão de Sistemas de Engenharia - Universidade Católica de Petrópolis/RJ

José Cristiano Pereira

Professor Doutor em Gestão de Sistemas de Engenharia - Universidade Católica de Petrópolis/RJ

RESUMO

A estratégia de manutenção baseada na condição (MBC) está alinhada com o contexto global de busca por eficiência, produtividade e redução de perdas. Nas últimas décadas, observou-se a expansão e a diversificação de técnicas de monitoramento e diagnóstico, com a finalidade de maximizar a performance dos ativos, minimizando os custos com reparo e o tempo de máquina parada. O objetivo deste trabalho foi explorar as práticas atuais de MBC em uma unidade fabril petroquímica e apontar oportunidades de desenvolvimento com base nos resultados obtidos. Foi conduzido um estudo de caso exploratório no setor de manutenção desta unidade. A coleta de dados combinou métodos qualitativos e quantitativos, através de entrevistas estruturadas com profissionais da área de manutenção, acesso às bases de dados de sistemas de gestão de manutenção e análise de procedimentos internamente documentados. Os resultados obtidos evidenciaram que existe monitoramento de condição de equipamentos a partir de um contexto local, com base em experiência nos modos de falha conhecidos e nas técnicas comerciais já consolidadas. As oportunidades de desenvolvimento identificadas neste estudo foram a ampliação da visão de equipamentos para a integração em sistemas, a priorização dos alarmes com base na criticidade dos ativos monitorados e a criação de uma sistemática de medição de performance da estratégia de MBC. O artigo endereça perspectivas de aplicações em MBC no contexto da empresa analisada.

Palavras-chave: manutenção, condição, monitoramento, petroquímica

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade e a disponibilidade dos ativos são fatores cruciais para a performance e a competitividade do setor produtivo. As estratégias de manutenção têm como objetivo garantir as condições de funcionamento dos equipamentos, antecipando falhas [1]. A estratégia de manutenção mais antiga e comum é denominada reativa ou corretiva, e consiste no reparo realizado após a falha ocorrer, sem análise ou planejamento prévio. A indisponibilidade operacional acarretada pela manutenção corretiva fomentou o desenvolvimento de técnicas preventivas, cujo objetivo é evitar a ocorrência das falhas com ações de manutenção previamente agendadas e definidas. Muito embora a manutenção preventiva teoricamente proporcione maior confiabilidade, os custos de reparo sobem consideravelmente, visto que sistemas íntegros e em boas condições de funcionamento muitas vezes são reparados sem necessidade. Diante desse contexto surge a manutenção preditiva, que pode ser dividida em Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) e Manutenção Baseada na Condição (MBC) [2]. A análise de modos de falha e efeitos (FMEA), combinada com o impacto das tarefas de manutenção, fundamentam a metodologia de MCC. As técnicas de MBC consistem no acompanhamento contínuo de variáveis críticas para a confiabilidade, cujas ações de manutenção são executadas com base na real condição dos ativos, antecipando-se às falhas e minimizando o desperdício de recursos.

Em recente estudo conduzido na indústria norte-americana [3], evidenciou-se uma lacuna tecnológica entre as pesquisas atuais em MBC e as práticas de manutenção adotadas pelas empresas. Se por um lado a academia propõe modelos de diagnóstico com base em modos de falha de componentes, por outro a realidade fabril ainda segue as técnicas de manutenção corretiva do início da revolução industrial.

No ano de 2015, o setor de manutenção de uma indústria petroquímica, localizada no estado do Rio de Janeiro, alterou o perfil de sua estratégia de manutenção para MBC. O presente trabalho baseou-se na condução de um estudo de caso para explorar as práticas de MBC atualmente desenvolvidas nessa empresa, onde se teve o objetivo de responder às seguintes perguntas:

Q1: Como é executada a estratégia de manutenção baseada na condição?

Q2: Quais foram os resultados obtidos com o uso das técnicas de manutenção baseada na condição?

Q3: Quais são os próximos desenvolvimentos de manutenção baseada na condição nessa empresa?

2. METODOLOGIA

Quanto aos fins, a pesquisa pode ser classificada como exploratória, pois visa o esclarecimento dos acontecimentos, a busca por novos entendimentos e perspectivas, a criação de ideias e hipóteses para estudos futuros. Quanto à abordagem, enquadra-se como um estudo de caso, visto que se restringe a uma empresa ou unidade, com caráter de profundidade e detalhamento [4]. Considerando a necessidade de explorar as práticas de MBC na empresa estudada, optou-se por utilizar o estudo de caso único como estratégia metodológica. A condução do estudo de caso é sugerida quando há necessidade de examinar comportamentos contemporâneos, onde as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não são evidentes, e quando não se podem manipular comportamentos relevantes [5]. É caracterizado pela ampla variedade de evidências, que podem ser documentos, artefatos, entrevistas e observações. O caráter do estudo de caso pode ser qualitativo ou quantitativo, ou ambos.

Estudos de caso podem ser utilizados para entender práticas do dia a dia e o significado para os envolvidos, que não são revelados em contatos breves [6]. As conclusões de um estudo de caso devem estar sustentadas com base nas evidências coletadas e na análise dos dados [7]. O estudo de caso desenvolvido na pesquisa é único, e têm como vantagem maior profundidade de análise, mas as conclusões obtidas não podem ser facilmente generalizadas. Casos múltiplos por sua vez pecam em profundidade e demandam mais recursos, mas possibilitam generalização de conclusões [8]. A condução do estudo de caso seguiu a proposta sugerida por [7], que pode ser vista na Figura 1 e apresentada a seguir:

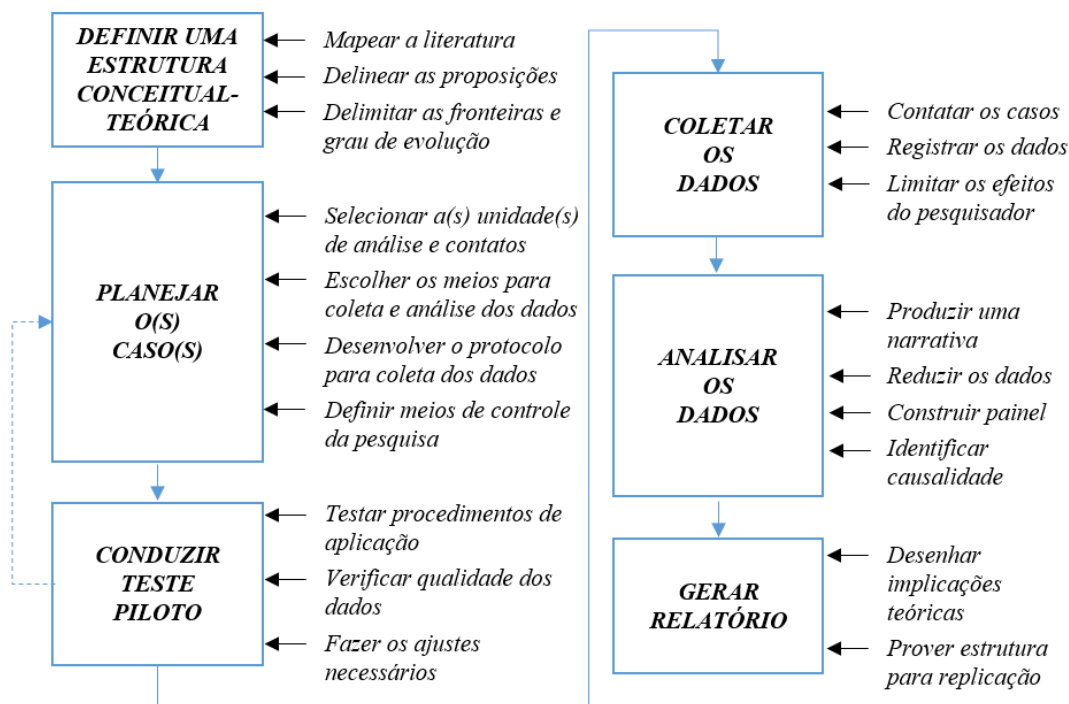


Figura 1 – Condução do Estudo de Caso [7]

O ambiente onde os dados da pesquisa foram coletados foi a unidade de manutenção de uma indústria petroquímica localizada no estado do Rio de Janeiro. Em 2015 esta unidade migrou sua estratégia para um foco preditivo de manutenção baseada na condição. Dessa forma, a pesquisa procurou a resposta para as perguntas descritas na seção introdutória deste estudo. O protocolo de coleta de dados combinou métodos qualitativos e quantitativos. Entrevistas estruturadas com os profissionais da área de manutenção foram conduzidas em junho de 2017, com o objetivo de explorar o entendimento nas questões da pesquisa. Ao todo foram entrevistados 7 engenheiros de manutenção, todos com vínculo empregatício direto. Dados históricos foram acessados nos sistemas de gestão de manutenção da empresa. O sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) forneceu uma visão de fluxos de trabalho e gestão das atividades de manutenção. As informações oriundas do sistema CMMS (*Computerized Maintenance Management System*) nortearam aspectos da estratégia de manutenção, como, por exemplo, a divisão dos planos e o perfil de criticidade dos ativos.

3. RESULTADOS

A estratégia de confiabilidade da empresa é baseada no *ranking* de criticidade, riscos e impacto financeiro, de forma que os recursos de manutenção e de investimento são direcionados para os equipamentos de maior importância para o negócio, visando garantir sua funcionalidade. Os planos de manutenção são ações que implementam a estratégia, balizados por técnicas de detecção, mitigação ou eliminação de falhas consolidadas pelo time de engenharia. As tarefas definidas nos planos são executadas periodicamente de acordo com as características de cada equipamento, seguindo procedimentos estabelecidos e garantindo o registro dos resultados obtidos no sistema de gestão de manutenção (CMMS e ERP). A análise dos resultados obtidos foi elencada de acordo com as especialidades de manutenção da unidade: instrumentos, equipamentos elétricos e equipamentos mecânicos-estáticos.

3.1 INSTRUMENTOS

Um *checklist* de inspeção visual da integridade mecânica de instrumentos foi implementado em 2015 com base no histórico de falhas. Utilizando-se da técnica do pareto, constatou-se que parte significativa dos modos de falha estava relacionada a deficiências de instalação, justificando a adoção da inspeção visual como técnica de manutenção baseada na condição. A tarefa de inspeção visual também contempla a análise do funcionamento do instrumento no historiador de variáveis de processos da planta e no *software* proprietário de gerenciamento de ativos, vinculado ao sistema digital de controle distribuído (SDCD). Utilizando dados extraídos do sistema ERP da unidade, nos últimos 12 meses, 944 inspeções visuais foram executadas, nas quais foram reportadas 329 anormalidades nos instrumentos. Dentre as anormalidades identificadas, pelo menos 83 representaram paradas de equipamentos e/ou de unidade evitadas. Uma das dificuldades relatadas pelos entrevistados foi a ausência de uma sistemática de quantificação das perdas evitadas com a antecipação das falhas. Os entrevistados ressaltaram a importância da qualificação dos executantes para a assertividade da percepção das falhas e para o sucesso das inspeções de campo. A detecção visual dos sintomas da falha nos instrumentos depende do conhecimento e da experiência de quem os inspecionam.

Em 2015, a equipe de instrumentação iniciou o desenvolvimento de um painel de bordo ligado ao historiador de variáveis da planta, com o objetivo de detectar falhas de funcionamento dos instrumentos a partir de comportamentos anormais conhecidos. O sistema foi implementado em instrumentos das caldeiras de geração de vapor, das extrusoras e dos reatores. Algoritmos de análise de variabilidade das medições foram configurados no aplicativo de apresentação de dados do historiador, com resultados em tempo real. O painel de bordo tem um viés de desenvolvimento e supervisão constantes, visto que a medida que os modos de falha são detectados, é testada a capacidade de diagnóstico do sistema. Nesse contexto, são aceitáveis ajustes dos algoritmos de detecção. Desde a sua implementação em 2015, o painel de bordo diagnosticou 3 cenários de parada de equipamentos. Uma das limitações apontadas pelos entrevistados é a quantidade de alarmes falsos reportados, fruto de um sistema ainda em desenvolvimento. Os resultados do painel de bordo apontam para uma replicação desta ferramenta a outros instrumentos críticos para a planta.

Os entrevistados ressaltaram a oportunidade de melhorar a capacidade de diagnóstico do painel de bordo com a diminuição do tempo de aquisição, atualmente de 1 minuto por amostra, para 1 segundo. Foi citada a necessidade de refinar os algoritmos de detecção das falhas com o apoio da engenharia de produção da planta. Da mesma forma, os alarmes reportados não possuem uma estratégia de priorização, o que atrasa o diagnóstico e prejudica o senso de urgência.

Para válvulas de controle de alta ciclagem com monitoramento de posição, foi implementada uma rotina de análise dos tempos de atuação. O tempo medido em cada ciclo de abertura e fechamento é armazenado e suas variações podem ser postumamente comparadas com valores de projeto. Os desvios percebidos no monitoramento da condição podem estar associados a limitações no funcionamento do atuador, deficiências no circuito de alimentação pneumática, defeitos nos sensores de posição e restrições internas no conjunto mecânico da válvula. Esta técnica foi implementada em 2016, contribuindo para o diagnóstico de 2 falhas que evitaram paradas de produção da unidade.

O sistema digital de controle distribuído (SDCD) da planta possui um módulo proprietário de gerenciamento de ativos. O *software* utiliza um protocolo de comunicação específico para obter em tempo real parâmetros de funcionamento dos instrumentos, propiciando a detecção das falhas e municiando a tomadas de decisões. As variáveis de diagnóstico podem ser transformadas em alarmes, customizados em níveis e prioridades. Os entrevistados reportaram pouco conhecimento dos executantes neste *software*, o que contribui para um baixo nível de utilização. Além disso, reportaram ausência de sistemática de registro dos diagnósticos oriundos especificamente deste sistema. Nos últimos 12 meses, pelo menos 3 diagnósticos partiram do módulo

de gerenciamento de ativos.

A empresa contrata um serviço externo de diagnóstico em válvulas de controle, que consiste em teste pré-determinados de atuação da válvula, no intuito de comparar a performance atual da válvula com valores de projeto. Através desta rotina de testes, é possível identificar modos de falha associados a desgaste de partes internas, tempo de resposta, vazamentos no sistema pneumático, tempo de resposta do conjunto e limitações no funcionamento do posicionador. Não existe sistemática de classificação dos diagnósticos oriundos de assinatura de válvulas, o que impede sua contabilização.

Os testes funcionais consistem na atuação de funções instrumentadas de segurança (SIFs) conforme norma IEC-61511. Seu viés é preditivo, visto que anormalidades no funcionamento de cada SIF podem ser detectadas durante o teste, e corrigidas em tempo. Nos últimos 12 meses, 145 testes funcionais foram executados. Não há registro de anormalidades encontradas, mas também não há um banco de dados específico para registro dos resultados obtidos. Para fins de comprovação, os testes ficam arquivados em relatórios digitalizados.

3.2 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Medições de resistência de isolamento de motores elétricos são realizadas periodicamente. Os resultados obtidos são comparados com valores referenciados pelo projeto, e são avaliados em comparação ao histórico de registros. A identificação de tendência no histórico de medições é feita pelo supervisor da especialidade. Esta técnica é executada há mais de 5 anos. No período entre janeiro de 2015 e maio de 2017, 17 motores foram identificados com mecanismos de degradação em isolamento, dentro de um universo de 800 equipamentos. Uma oportunidade de melhoria desse sistema é a criação de um banco de dados dedicado aos resultados dos testes, automatizando a criação de tendências e unificando a base de histórico.

Inspeções termográficas são realizadas com o intuito de apontar alterações na distribuição de calor (efeito Joule) esperada nos painéis elétricos. Alterações nas emissões de radiação infravermelha apontam falhas como aperto inadequado de conexões e desbalanceamento de fases. A técnica foi implementada há mais de dois anos, com 7 detecções de pontos quentes em subestações só no ano de 2016. Uma das limitações da sistemática atualmente adotada é a ausência de comprovação de que os painéis inspecionados estão energizados. Por conseguinte, a capacidade de detectar falhas através da distribuição do calor fica prejudicada.

O óleo isolante de transformadores de potência é periodicamente amostrado e enviado para laboratório externo especializado. Os modos de falha detectáveis com este método estão relacionados à degradação do isolante elétrico do transformador e presença de umidade. Esta técnica é executada há mais de 10 anos. Nos últimos 12 meses, 50 análises foram executadas e uma anormalidade detectada. Os entrevistados citaram que as alterações identificadas na análise de óleo balizaram a decisão de substituição do transformador. Com isso, foi evitada a parada de parte da fábrica por período de 1 semana.

As inspeções sensitivas são realizadas nas subestações com periodicidade semanal com o propósito de identificar sintomas relacionados à possíveis falhas dos componentes elétricos. O *checklist* contempla identificação de vazamentos de óleo em transformadores, inspeção visual de baterias e revisão dos alarmes dos sistemas. Nos últimos 12 meses, um vazamento de óleo em transformador de entrada da fábrica foi identificado e sanado através de inspeção preditiva. Logo, foi evitada uma parada da unidade por falha no transformador.

Em 2016 foi implementada a análise de condutância em baterias utilizando instrumento e *software* específicos para esta aplicação. Com uma periodicidade de 3 meses, é possível monitorar a capacidade condutiva das baterias, *ripple*, tensão de elementos e termografias, reportando tendências de degradação e iminências de falha. Com o uso desta ferramenta foi diagnosticado potencial de falha em um banco de baterias do sistema de alimentação da unidade, que acarretaria *shutdown* de toda a unidade.

A isolamento elétrica dos enrolamentos estatóricos dos motores de indução de média tensão (13,8kV) é monitorada há mais de 6 anos através de um analisador de descargas parciais, com o intuito de avaliar. Os dados coletados pelo sistema são avaliados com periodicidade bimestral. Uma anormalidade já foi identificada e está em fase de acompanhamento de tendência.

Foi evidenciada a ausência de banco de dados específico para o registro dos resultados das medições e inspeções sensitivas. O histórico do monitoramento de condição dos equipamentos elétricos contribuiria para a validação estatística das falhas e criação de tendências de degradação dos ativos.

3.3 EQUIPAMENTOS MECÂNICOS-ESTÁTICOS

A inspeção visual de equipamentos estáticos é amplamente utilizada para identificação de fenômenos de degradação mecânica e química. Esta técnica permite a identificação de modos de falha relacionados à

corrosão acentuada, qualidade de soldas, trincas, empenamentos, vazamentos e deformações. As inspeções visuais possuem periodicidade definida e podem ser realizadas com o apoio de instrumentos óticos como lentes de aumento e câmeras. Em 2015 foi adotada a utilização de um quadcóptero com câmera acoplada, agilizando o monitoramento de pontos inacessíveis aos executantes.

Nas serpentinhas dos fornos de pirólise é feito o acompanhamento periódico do alongamento dos tubos utilizando uma régua. As alterações nas medições evidenciam o fenômeno de fluência, que contribui para a fragilização e consequente falha dos tubos. Os silos de estocagem são monitorados em inspeções periódicas que visam apontar atenuação ou agravamento de deformações nas paredes externas do equipamento. Estas técnicas balizam a definição do melhor momento de manutenção, garantindo a máxima disponibilidade dos ativos com base nos modos de falha conhecidos.

Medições de espessura em equipamentos com uso de ultrassom possibilitam o diagnóstico de falhas relacionadas ao desgaste dos materiais. Baseado no histórico de medições e na espessura mínima aceitável, é possível criar tendências de perda de material. Esta análise é denominada avaliação da vida residual, e possibilita a extensão do tempo de operação do equipamento até o nível de espessura mínimo aceitável.

Com a orientação de consultoria especializada, recentemente foi adotada a prática de inspeção baseada em risco, definida a partir de um estudo multidisciplinar que considera as características de projeto dos equipamentos, condições de operação, histórico de inspeções, consequências das falhas e tempo de operação dos equipamentos. O objetivo deste método é racionalizar as atividades de inspeção para os riscos e modos de falha específicos de cada equipamento. Como resultado, inspeções não-intrusivas e monitoramentos de condição são recomendados. Foi identificado como fator limitante da manutenção baseada na condição o acompanhamento contínuo das variáveis de processo associado aos modos de falha dos equipamentos estáticos.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o estado atual das práticas de manutenção baseada na condição observados em uma indústria brasileira do setor petroquímico. O estudo de caso foi conduzido em junho de 2017 e teve como objetivo identificar os métodos de execução da manutenção baseada na condição, seus resultados obtidos e as oportunidades de desenvolvimento na área. Engenheiros de manutenção foram entrevistados, e as respostas obtidas foram complementadas com dados quantitativos extraídos dos sistemas de gestão da manutenção da empresa.

Em resposta à primeira pergunta da pesquisa, a MBC é executada de diferentes formas na empresa. Em se tratando de instrumentos, inspeções visuais periódicas, testes funcionais, testes de performance de válvulas de controle e monitoramento dos comportamentos de falha são técnicas atualmente empregadas. Sistemas elétricos estão submetidos à estratégia de MBC através de acompanhamento de tendência de medições e análises, inspeções sensíveis e inspeções termográficas. Para os equipamentos mecânicos-estáticos, inspeções visuais e acompanhamento periódico de medições foram identificados como MBC.

Em resposta à segunda pergunta, algumas das técnicas de MBC utilizadas já evitaram cenários de parada emergencial de equipamento a partir de um diagnóstico preciso do modo de falha. Em instrumentos, destacam-se a inspeção visual e o monitoramento contínuo de instrumentos. Para os sistemas elétricos, medições em motores, análises de óleo e inspeções sensíveis reportaram os melhores resultados. A inspeção visual também se mostrou efetiva em equipamentos mecânicos-estáticos.

Em resposta à terceira pergunta, algumas limitações foram identificadas pelo estudo. Primeiramente, não há uma medição clara do desempenho das técnicas de MBC. A assertividade dos diagnósticos não é registrada, e não há contabilização de “alarmes falsos”, que apontariam oportunidades de melhorar a robustez de cada técnica. Da mesma forma, os diagnósticos realizados com sucesso não são expostos ao time de manutenção, ficando registrados “na memória” de cada especialidade. Por conseguinte, não há uma prática de calcular as perdas evitadas com a correta execução de MBC. Estudos futuros podem relacionar esses fatores com a dificuldade de propagação da cultura em MBC.

As técnicas de MBC executadas pela empresa estão associadas a modos de falha conhecidos da literatura, ou à experiência da equipe com características específicas de cada processo produtivo e equipamento. As práticas não estão associadas a um estudo prévio de FMEA, onde todos os modos de falha são elencados. Da mesma forma, não há estudo estatístico das falhas já reportadas, o que balizaria a identificação de *bad actors* de confiabilidade. Neste contexto, emerge como oportunidade de desenvolvimento a integração dos modos de falha com as características dos processos produtivos, em uma visão sinérgica entre Engenharia de Manutenção e Engenharia de Operações. Nesse contexto, a MBC salta do patamar de análise

do componente/equipamento para um nível de sistema. Dessa forma, o monitoramento pode ser baseado em indicadores mais facilmente reportáveis, como o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MUCHIRI, PETER N et al. "Empirical analysis of maintenance performance measurement in Belgian industries." *International Journal of Production Research*, 48:20, 5905-5924 (2010).
- [2] KOTHAMASU, RANGANATH et. at. "System health monitoring and prognostics – a review of current paradigms and practices." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 28:9-10, 1012-1024 (2006).
- [3] JIN, XIAONING et. al. "Present Status and Future Growth of Advanced Maintenance Technology and Strategy in US Manufacturing." *International Journal of Prognostics and Health Management*. 12:6, 1-18 (2016).
- [4] ROBSON, COLIN. *Real World Research*. 2nd ed. Blackwell Publishing, Malden, United States (2002).
- [5] YIN, ROBERT. *Estudo de Caso: Planejamento e Métodos*. 2ª ed. Bookman, Porto Alegre, Brasil (2001).
- [6] HARTLEY, JEAN. *Case Study Research*. Em: CATHERINE CASSELL & GILLIAN SYMON. *Essential Guide to Qualitative Methods in Organizational Research*. SAGE, London, United Kingdom (2004).
- [7] MIGUEL, PAULO AUGUSTO CAUCHICK. "Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução". *Produção*. 17:1, 216-229 (2007).
- [8] VOSS, CHRIS et. al. "Case research in operations management." *International Journal of Operations and Production Management*, 22:2, 195-219 (2002).