



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ESTIMAÇÃO DE GANHOS FINANCEIROS EM
PROJETOS DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE – UMA
PROPOSTA METODOLÓGICA E ESTUDOS DE CASO**

Fábio Barros de Carvalho

11/06/2010

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Laboratório de Validação de Sistemas

Av. Antonio Carlos, 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG

Fone: +55 31 34095000



Fábio Barros de Carvalho

ESTIMAÇÃO DE GANHOS FINANCEIROS EM PROJETOS DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE – UMA PROPOSTA METODOLÓGICA E ESTUDOS DE CASO

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sinais e Sistemas

Orientadora: Carmela Maria Polito Braga

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia

2010

Folha de Aprovação a ser anexada

*À minha amada esposa
Priscilla*

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente à minha esposa Priscilla pelo carinho, pela força, e por me fazer acreditar que era possível mesmo quando não parecia ser.

Agradeço à minha orientadora Prof. Carmela Maria Polito Braga pelos direcionamentos e pela objetividade com que me ajudou a solucionar dúvidas e a controlar o andamento das atividades.

Agradeço ao Eng. Vicente Amâncio que me despertou o interesse pelo tema e cuja sabedoria e experiência inspiraram muitas das técnicas aqui propostas.

Agradeço ao Eng. Bernardo Torres por ter me incentivado a trilhar este caminho e por ter me mostrado a importância de uma conquista como esta.

Agradeço à Accenture Automation & Industrial Solutions, pelas oportunidades de aplicar no mundo real a metodologia proposta neste trabalho.

Agradeço à meus pais e irmãos que sempre me apoiaram e deram o suporte necessário para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço também a todos os amigos, familiares e colegas de trabalho, pelo compartilhamento de experiências que contribuíram para o sucesso desta jornada.

RESUMO

Uma metodologia para estimação de ganhos em projetos é proposta como estratégia para a análise de investimentos de uma empresa. A metodologia é direcionada para projetos de automação e controle e estende alguns conceitos e práticas líderes da literatura. Sua aplicação propicia uma seleção do portfólio de projetos com base no conhecimento prévio do potencial de retorno de cada empreendimento. Ela é composta de seis passos principais que vão desde o entendimento do alcance do projeto e dos objetivos de negócio da companhia, passando pela análise do comportamento histórico do processo até culminar no cálculo do potencial de ganho do empreendimento. Técnicas de análise estatística multivariada, como PLS, matriz de variabilidade e correlação cruzada são utilizadas na metodologia. Três estudos de caso são conduzidos envolvendo dados, processos e projetos reais para demonstrar a aplicabilidade do método proposto.

ABSTRACT

A methodology for estimating project benefits is proposed as a strategy to analyse the investments of a company. The methodology is focused on control and automation projects and extends some concepts and leading practices present on the literature. Its implementation supports the portfolio selection task using the potential return of each endeavour as a decision factor. The method is composed by six major steps starting from an understanding of the project scope together with the company business objectives, passing through an analysis of the historical behavior of the productive process and ending with the calculation of the project's potential benefits. Multivariate statistical analysis techniques like PLS, variability matrix and cross correlation are incorporated on the methodology. Three case studies are conducted over real data, process and projects in order to demonstrate the applicability of the proposed method.

NOMENCLATURA E SÍMBOLOS

APC	<i>Advanced Process Control</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAP	<i>Certified Automation Professional</i>
CCM	Centro de Controle de Motores
CLP	Controlador Lógico Programável
CO	<i>Control Output</i>
DCS	<i>Distributed Control System</i>
DF	Disponibilidade Física
FCC	Função de Correlação Cruzada
FEL	<i>Front-End Loading</i>
IPA	<i>Independent Project Analysis</i>
ISA	<i>International Society of Automation</i>
MSSD	<i>Mean Square Successive Difference</i>
MV	<i>Manipulated Variable</i>
OPC	<i>OLE for Process Control</i>
PCA	<i>Principal Components Analysis</i>
PLS	<i>Partial Least Squares</i>
PMI	<i>Project Management Institute</i>
PV	<i>Process Variable</i>
RFP	<i>Request For Proposal</i>
RGA	<i>Relative Gain Array</i>
ROI	<i>Return on Investment</i>
SP	<i>Set Point</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
NOMENCLATURA E SÍMBOLOS	8
ÍNDICE	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Organização dos capítulos.....	16
2 O CICLO DE VIDA DE UM PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO	17
2.1 Modelo ISA.....	18
2.1.1 Análise de Viabilidade.....	19
2.1.2 Definição do Projeto	20
2.1.3 Projeto detalhado do sistema.....	20
2.1.4 Desenvolvimento do Software	21
2.1.5 Implantação	23
2.1.6 Suporte e operação assistida.....	24
2.2 Modelo FEL (Front-End-Loading).....	24
2.2.1 FEL 1 – Análise do Negócio	25
2.2.2 FEL 2 – Desenvolvimento do Escopo	25
2.2.3 FEL 3 – Planejamento da Implantação	26
2.2.4 Execução	27
2.2.5 Operação	27
2.3 Comentários Finais	27
3 ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PROJETOS	29
3.1 Direcionadores de negócio	29
3.1.1 A influência da automação.....	31
3.2 Investimento	34
3.3 Ferramentas de análise financeira.....	37
3.3.1 Valor Presente	37
3.3.2 Valor Presente Líquido	38
3.3.3 Taxa Interna de Retorno.....	39
3.3.4 Retorno contábil sobre o investimento (ROI)	39
3.3.5 Período de <i>payback</i> do investimento	40
3.4 Comentários Finais	40
4 PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ESTIMAÇÃO DE GANHOS EM PROJETOS DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE.....	42
4.1 Passo 1 – Entender o escopo do projeto.....	43
4.2 Passo 2 – Identificar os direcionadores de negócio impactados pelo projeto ..	44
4.3 Passo 3 – Identificar as variáveis de processo que têm influência sobre os direcionadores de negócio	44
4.4 Passo 4 – Levantar dados	45
4.5 Passo 5 – Estimar o ganho potencial	46
4.5.1 Análise baseada no comportamento estatístico	47
4.5.2 Análise baseada em eventos discretos	76
4.6 Passo 6 – Analisar a viabilidade financeira do empreendimento	80
4.7 Considerações sobre níveis de incerteza	80

4.8	Comentários Finais	81
5	ESTUDOS DE CASO.....	82
5.1	Estudo de Caso #1 – Implementação de um sistema para controle avançado de Espessadores de Rejeito	82
5.1.1	Descrição do processo.....	82
5.1.2	Descrição do problema	83
5.1.3	Escopo do projeto	84
5.1.4	Estimação de ganhos do projeto	84
5.2	Estudo de Caso #2 – Implementação de controle automático de alimentação em linhas de peneiramento de uma unidade de beneficiamento mineral.....	96
5.2.1	Descrição do processo.....	96
5.2.2	Descrição do problema	97
5.2.3	Escopo do projeto	98
5.2.4	Estimação de ganhos do projeto	99
5.3	Estudo de Caso #3 – Implementação de um Novo Sistema de Controle e Automação de Aperto Mecânico em Conexões de Tubos Petrolíferos.....	106
5.3.1	Introdução	106
5.3.2	Escopo do projeto	107
5.3.3	Medição de ganhos do projeto.....	107
5.4	Comentários Finais	113
6	CONCLUSÕES	115
6.1	Sugestões para continuidade	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais benefícios do controle avançado de processos – resultados da pesquisa de Bauer e Craig (2008).....	15
Figura 2 – Modelo de ciclo de vida ISA-CAP para projetos de automação (Trevathan, 2006)	19
Figura 3 – Ciclo de Vida do Projeto segundo o IPA (Santiago et al, 2008)	25
Figura 4 – Gráfico de tendência de uma malha de controle de temperatura.....	31
Figura 5 – Associação lógica de indicadores de curto prazo com indicadores estratégicos de longo prazo	32
Figura 6 – Gráfico de tendência de uma malha de controle de vazão	33
Figura 7 - Associação lógica de indicadores de curto prazo com indicadores estratégicos de longo prazo	33
Figura 8 - Benefícios da redução de variabilidade	34
Figura 9 – Composição do investimento de um projeto - Serviços	35
Figura 10 - Composição do investimento de um projeto - Equipamentos.....	35
Figura 11 - Composição do investimento de um projeto - Softwares	36
Figura 12 – Principais elementos de custo em projetos de controle avançado – resultados da pesquisa (Bauer; Craig, 2008).....	36
Figura 13 – Visão geral da metodologia	42
Figura 14 – Deslocamento de média em função da redução de variabilidade	48
Figura 15 – Variabilidade total e capacidade (Shunta, 1995)	49
Figura 16 – Deslocamento de média pelo <i>critério da igual violação</i> (adaptado de Guimarães Neto, 2006)	52
Figura 17 – Exemplo de eliminação de piores resultados.....	54
Figura 18 – Representação esquemática da matriz de variabilidade (Farenzena e Trierweiler, 2006).....	56
Figura 19 – Gráficos de tendência de variabilidade do processo	60
Figura 20 – Gráfico de tendência da variável de negócio	63
Figura 21 – Gráfico de tendência das variáveis de processo.....	64
Figura 22 – Exemplo de extração das componentes principais de um conjunto de amostras.....	67
Figura 23 – Esquemático do forno.....	70
Figura 24 – Gráfico de tendência da temperatura anódica.....	73
Figura 25 – Respostas dos Especialistas (análise qualitativa).....	75
Figura 26 – Respostas dos Especialistas (análise quantitativa).....	75
Figura 27 – Compilação das respostas	76
Figura 28 – Índices de sensibilidade calculados.....	76
Figura 29 – Tela de operação do Sistema de Captação e Recuperação de Água	83
Figura 30 – Exemplo de planilha de registros históricos de indicadores.....	87
Figura 31 – Carta de controle da Taxa de Reuso.....	88
Figura 32 – Exemplo de planilha eletrônica para cálculo da Taxa Interna de Retorno..	94
Figura 33 – Tela de operação do Peneiramento Secundário	97
Figura 34 – Exemplo de planilha para registro de paradas de equipamentos	100
Figura 35 – Representação do balanço de massa do Peneiramento Secundário	102
Figura 36 – Exemplo de planilha eletrônica para cálculo da Taxa Interna de Retorno	105
Figura 37 – Gráfico de tendência do torque de aperto.....	109
Figura 38 – Histograma do torque de aperto - ANTES	109
Figura 39 – Histograma do torque de aperto - DEPOIS	110

Figura 40 – Exemplo de variável reduzida Z	111
Figura 41 – Deslocamento da média do torque de aperto.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fluxo de caixa simples.....	38
Tabela 2 – Cálculo do VPL do empreendimento.....	38
Tabela 3 – Valores históricos das variáveis de negócio e de processo.....	65
Tabela 4 – Coeficientes de Correlação	66
Tabela 5 – Índices de Sensibilidade Ponderada.....	66
Tabela 6 – Lista de variáveis envolvidas no processo	72
Tabela 7 – Coeficientes de Regressão e Índices de Sensibilidade Ponderada	73
Tabela 8 – Informações do projeto	85
Tabela 9 – Coeficientes de Correlação	90
Tabela 10 – Índices de Sensibilidade Ponderada.....	90
Tabela 11 – Cálculo do VPL	93
Tabela 12 – Informações do projeto	98
Tabela 13 – Grau de impacto das causas de parada de equipamento	101
Tabela 14 – Cálculo do ganho potencial	102
Tabela 15 – Cálculo do VPL	104
Tabela 16 – Informações do projeto	107
Tabela 17 – Comparativo “Antes x Depois” do torque de aperto	108
Tabela 18 – Análise de probabilidade de rejeição	111
Tabela 19 – Cálculo do deslocamento de média	112

1 INTRODUÇÃO

De maneira geral, pode-se afirmar que o objetivo de qualquer empresa do setor industrial se resume a produzir com qualidade, em quantidades que atendam à demanda do mercado, minimizando os custos de produção e observando a sustentabilidade do negócio. Diversos são os fatores que podem contribuir no alcance deste objetivo. Dentre eles destacam-se a manutenção de um parque tecnológico moderno; a adoção de processos de trabalho e práticas operacionais eficientes; a correta gestão dos recursos humanos (focada em capacitação e reconhecimento); e ações de responsabilidade socio-ambiental. Um outro importante fator que está associado a práticas operacionais eficientes é o controle automático de processos. Marlin (2000) o classifica como um dos três elementos críticos no alcance da excelência em desempenho¹.

Desde as lógicas discretas de intertravamento até as técnicas de controle avançado e multivariável, o controle automático de processos desempenha um papel fundamental na indústria. Ele pode atuar aumentando a produtividade e eficiência do processo, promovendo uma maior segurança operacional, reduzindo o impacto ambiental da produção, protegendo e aumentando a vida útil dos equipamentos, reduzindo a variabilidade do processo produtivo e/ou aumentando a qualidade dos produtos. Estes objetivos coincidem com os principais direcionadores de negócio das empresas do setor industrial e é por isso que as iniciativas de automação e controle frequentemente figuram nos documentos do seu plano estratégico.

Assim como a maioria das ações contidas no planejamento estratégico de uma companhia, a implementação de soluções de controle automático deve ser realizada por meio de projetos (Embiruçu, 2004). Projetos necessariamente implicam em investimentos. E toda organização, sem exceção, possui menos recursos para investir do que a sua legítima demanda por investimentos (Doug White, 2007). Este cenário faz com que a disputa pela aprovação de determinados projetos fique ainda mais acirrada. Cada vez mais se faz necessária uma avaliação criteriosa da viabilidade do projeto e uma posição consistente sobre o seu retorno potencial para a empresa.

O verdadeiro valor das tecnologias modernas só é reconhecido pelas companhias quando traz consigo um retorno financeiro mensurável. Porém, os benefícios que vêm

¹ Juntamente com o projeto dos equipamentos e as condições operacionais da planta.

sendo utilizados como argumentos na defesa de projetos envolvendo estas tecnologias são, na maioria dos casos, intangíveis e com baixa sustentação econômica. Isso pode levar à duas situações igualmente ruins:

- o projeto não é aprovado por não se justificar economicamente;
- o projeto é aprovado porém, dada a natureza subjetiva de seus argumentos, cria falsas expectativas nas partes interessadas.

A segunda situação, quando ocorre, compromete muito os futuros empreendimentos. Isso porque, ao se constatar que o projeto não atendeu a uma ou mais expectativas criadas no início, perde-se a confiança em outras iniciativas de mesma natureza.

Quando se trata de projetos de automação e controle, o cenário é um pouco mais favorável. No ano de 2006, Bauer e Craig (2008) conduziram uma pesquisa envolvendo usuários finais e fornecedores de soluções de controle avançado de processos do mundo inteiro. Um dos itens da pesquisa questionou sobre os benefícios trazidos por aplicações como esta. A Figura 1 apresenta o ranking dos principais benefícios na opinião dos profissionais consultados.

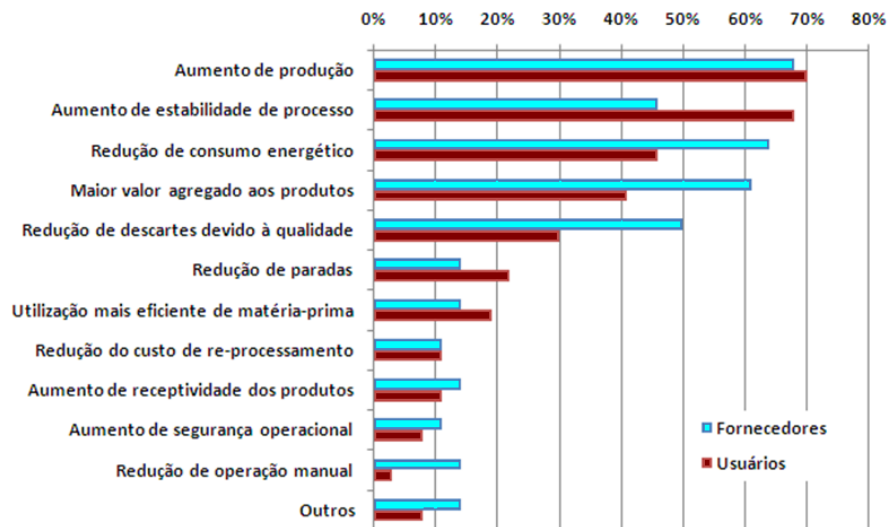


Figura 1 – Principais benefícios do controle avançado de processos – resultados da pesquisa de Bauer e Craig (2008)

Ao se observar os itens listados no gráfico da Figura 1, pode-se perceber que a maioria deles é absolutamente mensurável. Tanto é que, em grande parte das empresas, já existem indicadores numéricos utilizados para acompanhar a evolução destas grandezas no tempo. Por outro lado, tais grandezas não são impactadas única e exclusivamente pelo nível de controle e automação da unidade. Elas são, de fato, um

reflexo de tudo o que acontece na operação da planta. Isso quer dizer que, ao se defender a viabilidade de um projeto relacionado ao controle automático de processos, o desafio está muito menos associado à tangibilidade dos benefícios trazidos por ele, mas sim à dificuldade de se estimar antecipadamente qual será o real impacto nestes indicadores. Este é o principal motivador para este trabalho, que tem por objetivo a proposição de uma metodologia para se estimar os benefícios de um projeto de automação e controle antes que ele ocorra.

Algumas das técnicas que compõem a metodologia foram retiradas das referências bibliográficas pesquisadas, outras são extensões de conceitos da literatura e outras são contribuições deste trabalho. Como resultado, procurou-se elaborar um método que, ao mesmo tempo que suportado por uma base teórica sólida, seja de fácil aplicação prática, ofereça resultados consistentes e seja o mais horizontal possível, podendo ser aplicado em diferentes projetos de diferentes segmentos industriais.

1.1 Organização dos capítulos

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral das etapas em que se divide um projeto de sistema de controle e automação típico. O objetivo do capítulo é promover o entendimento sobre o que é um projeto desta natureza e sobre quais as principais atividades de engenharia envolvidas.

O Capítulo 3 se dedica exclusivamente à etapa de análise de viabilidade. Esta etapa é o foco deste trabalho pois é neste momento que ocorrem os estudos sobre potenciais de custo e de retorno do projeto.

A principal contribuição do trabalho é discutida no Capítulo 4, ou seja, o método para estimação de ganhos em projetos de automação e controle. A metodologia é composta de seis passos sendo que cada passo é discutido em uma sub-seção separada. Ao longo do capítulo estão incluídos exemplos didáticos de aplicação das técnicas mais elaboradas de forma a facilitar o entendimento.

No Capítulo 5 são apresentados três estudos de caso baseados em processos e dados reais. Os dois primeiros são utilizados para ilustrar a aplicação da metodologia em sua íntegra, enquanto o terceiro serve para mostrar como alguns conceitos presentes na metodologia podem ser aproveitados para o caso em que se pretende medir (e não estimar) os resultados de um projeto já concluído.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões para sua continuidade.

2 O CICLO DE VIDA DE UM PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Um projeto é definido como um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo (*Project Management Institute, 2004*).

O caráter temporário e exclusivo de cada projeto é o que os diferencia das operações rotineiras de uma organização. Eles podem variar quanto ao alcance (em que nível da organização está inserido), quanto ao tamanho da equipe envolvida e quanto à sua duração. Podem existir projetos envolvendo uma única pessoa até milhares de pessoas. Da mesma forma, podem existir projetos com duração de uma semana até vários anos. Exemplos de projetos incluem, mas não se limitam a (*Project Management Institute, 2004*):

- Desenvolvimento de um novo produto ou serviço;
- Mudança de estrutura, de pessoal ou de estilo de uma organização;
- Projeto de um novo veículo de transporte;
- Desenvolvimento ou aquisição de um sistema de informações novo ou modificado;
- Construção de um prédio ou instalação;
- Construção de um sistema de abastecimento de água para uma comunidade;
- Realização de uma campanha por um cargo político;
- Implementação de um novo procedimento ou processo de negócios;
- Atendimento a uma cláusula contratual.

É por meio de projetos que a organização executa o seu plano estratégico. Eles podem ser resultados de uma demanda específica de mercado; uma necessidade organizacional; uma solicitação dos clientes; uma necessidade de avanço tecnológico; ou mesmo de uma deliberação legal.

Os projetos podem ser divididos em fases para oferecer melhor controle gerencial e para que se possam estabelecer objetivos intermediários. O conjunto de fases em que se divide um projeto é conhecido como o ciclo de vida do projeto.

Os ciclos de vida do projeto geralmente definem:

- Que parte do trabalho técnico deve ser realizada em cada fase;
- Quais os produtos a serem entregues em cada fase e quando essas entregas devem ser geradas;
- Como cada produto será revisado, verificado e aceito;
- Quais os recursos envolvidos em cada fase (exemplo: equipe de engenharia, equipe de montagem, maquinário, membros da alta gestão, etc...);

Segundo o *Project Management Institute* (2004), não existe uma única melhor maneira para definir um ciclo de vida ideal do projeto. Algumas organizações estabeleceram políticas que padronizam todos os projetos com um único ciclo de vida, enquanto outras permitem que a equipe de gerenciamento de projetos escolha o ciclo de vida mais adequado para seu próprio projeto.

Dada a semelhança em natureza e aplicação de seus projetos, alguns setores desenvolveram um ou mais ciclos de vida preferenciais a serem seguidos. Esse é o caso da engenharia, e mais especificamente da Engenharia de Controle e Automação.

Considera-se que os dois modelos de ciclo de vida que são apresentados nos itens 2.1 e 2.2 sejam aqueles mais comumente aplicados em projetos de engenharia em geral e em projetos de automação e controle.

2.1 Modelo ISA

Um modelo de ciclo de vida específico para projetos de automação industrial e amplamente adotado pelas empresas é aquele proposto pela ISA através da publicação de Trevathan (2006). A Figura 2 apresenta um esquemático deste modelo.



Figura 2 – Modelo de ciclo de vida ISA-CAP para projetos de automação (Trevathan, 2006)

Os itens a seguir descrevem em linhas gerais cada fase do ciclo de vida de projeto segundo o modelo da ISA.

2.1.1 Análise de Viabilidade

A análise de viabilidade é a etapa inicial de um projeto de automação típico. Nesta etapa basicamente avalia-se a relevância dos fatores e necessidades que demandaram o projeto, e confronta-se o esforço necessário para empreendê-lo com os recursos físicos, humanos e financeiros disponíveis para tal.

A análise se inicia com a definição do escopo preliminar do projeto onde são descritos de forma clara a necessidade/problema a ser sanada/resolvido e as soluções que se pretende aplicar para alcançar este objetivo. Em geral, fatores e necessidades que geram demandas para novos projetos estão relacionados aos seguintes temas:

- Segurança;
- Produtividade;
- Qualidade;
- Confiabilidade de equipamentos;
- Manutenção;
- Operabilidade;
- Maturidade tecnológica;

A definição preliminar do escopo do projeto deve conter informações suficientes para que os custos relacionados ao empreendimento possam ser estimados com certo grau de precisão. Além disso, deve haver informação suficiente também para que possam ser estimados os ganhos quantitativos com o projeto.

De posse das estimativas de custo e retorno do projeto, pode-se proceder com a análise de custo/benefício. Várias são as maneiras de se realizar a análise de custo/benefício. Algumas delas serão apresentadas em 3.3. Um resultado positivo ao final da análise de custo/benefício implica que, financeiramente, o projeto é viável.

2.1.2 Definição do Projeto

Esta etapa consiste basicamente na elaboração de um plano estratégico que identifica os principais requisitos do projeto e também a melhor abordagem para cumprir tais requisitos. Nesta definição são traçadas estratégias operacionais tais como: envolvimento dos indivíduos chave do cliente; planejamento de acordo com o calendário de paradas de planta e disponibilidade de equipamentos; estratégia para análise e escolha das soluções técnicas mais adequadas ao ambiente do cliente e aos objetivos do projeto; entre outras.

É nesta etapa, também, onde o escopo do projeto é definido em maiores detalhes fornecendo uma base de referência sólida para as etapas seguintes de execução.

Finalmente, aqui é realizada uma nova estimativa do custo do projeto e são identificadas outras formas de se conduzir o trabalho minimizando tais custos.

2.1.3 Projeto detalhado do sistema

Os principais passos contemplados na etapa de projeto detalhado são os seguintes:

- **Análise de risco** - realização de uma análise minuciosa dos riscos associados ao desenvolvimento e operação do sistema. Sendo que se entende por risco um evento ou condição incerta que, se ocorrer, terá um efeito positivo ou negativo sobre pelo menos um objetivo do projeto, como tempo, custo, escopo ou qualidade (*Project Management Institute*, 2004). Durante a análise pode-se identificar riscos associados ao cliente; à complexidade da solução; a fatores de desempenho e confiabilidade; às estimativas de projeto (custo, prazo, retorno); aos requisitos gerais e de qualidade; aos recursos humanos; à segurança pessoal e operacional; à

tecnologia empregada; entre outros. Uma vez feita a identificação dos riscos, é preciso ranqueá-los quanto à probabilidade e impacto e gerar planos de ações de mitigação de tais riscos.

- **Estabelecimento de diretrizes** - Seleção dos padrões de engenharia, normas e templates que deverão ser aplicados à documentação a ser gerada e/ou servir de referência no decorrer dos desenvolvimentos do projeto. Em geral esta seleção é feita visando-se respeitar os critérios de projeto do cliente e visando seguir boas práticas de mercado.
- **Especificação de equipamentos e instrumentos** – Elaboração dos documentos de especificação técnica dos equipamentos a serem adquiridos durante o projeto e elaboração das folhas de dados de instrumentos.
- **Decomposição funcional da solução** – Decomposição do sistema complexo em funções simples, tarefa e sub-tarefa, tendo como foco as funções que o produto do projeto deve exercer. Em geral esta decomposição é realizada utilizando-se Diagramas de Fluxo de Dados (DFD) e Gráficos Estruturados.
- **Definição da estratégia de comunicação** - Seleção do meio físico de comunicação, definição da arquitetura de rede e protocolos a serem utilizados.
- **Desenvolvimento do Descritivo Funcional** – o descritivo funcional é o documento que agrupa informações como: descritivo do processo sobre o qual está sendo aplicado o projeto de automação; esquema de controle; regras de intertravamentos; regras de alarmes; modelos de telas para interface homem-máquina; modelos de relatórios; etc...
- **Desenvolvimento do Roteiro de Testes** – Escolha das metodologias a serem aplicadas para realização de testes individuais e integrados dos requisitos funcionais do sistema e elaboração de roteiros para estes testes.
- **Aquisições** – Em função do prazo para fabricação e entrega de equipamentos, algumas ordens de compra são disparadas já ao final da etapa de projeto detalhado.

2.1.4 Desenvolvimento do Software

Esta etapa consiste na execução do planejamento e no desenvolvimento da solução previamente detalhada e especificada. Tais desenvolvimentos podem incluir:

- Desenvolvimento dos sistemas de interface homem-máquina
 - Telas sinóticas;
 - Animações e esquemas de cores;
 - Botões de comando e configuração;
 - Apresentação de alarmes e eventos;
 - Etc...
- Desenvolvimento da base de dados e relatórios
 - Historiador de dados e plano de armazenamento de dados;
 - Política de backup, redundância e restauração;
 - Relatórios de dados;
- Desenvolvimento da lógica de controle
 - Diagramas lógicos;
 - Código fonte (utilizando *ladder*, blocos de função, texto estruturado, etc...)
 - Receitas de processo/produção
 - Intertravamentos
 - Alarmes

Além dos desenvolvimentos citados, outras atividades estão contempladas nesta etapa do ciclo de vida do projeto. São elas:

- Implementação do plano de leitura/escrita de dados – visando garantir a integridade da informação transmitida e recebida pelo sistema de automação, além de garantir máxima taxa de transferência tendo em vista a infra-estrutura de rede disponível;
- Implementação do plano de segurança operacional – visando garantir conformidade com os requisitos de segurança do cliente, mitigando riscos de danos materiais e pessoais;
- Revisão de conformidade com o escopo – realizada periodicamente ao longo da etapa de desenvolvimento com o objetivo de verificar se os desenvolvimentos estão em conformidade com os requisitos funcionais do projeto;

- Desenvolvimento e Implementação do Plano de Testes Funcionais de Aceitação (FAT)² – visando testar o sistema de automação quanto à integração e conformidade com os requisitos funcionais;
- Organização da documentação e preparação para *start-up* – agrupamento de todos os documentos e manuais gerados ao longo da etapa de desenvolvimento visando criar uma base de conhecimento a ser transferida para o cliente e usuários finais;

2.1.5 Implantação

O objetivo principal desta etapa é a implantação no ambiente de produção dos desenvolvimentos realizados na etapa anterior. Para tal, algumas atividades preparatórias se fazem necessárias. São elas:

- Verificação do status dos dispositivos de campo;
- Inspeção dos equipamentos instalados;
- Instalação de hardware e software;
- Realização de testes preliminares no sistema para identificação e correção de problemas
 - Testes do programa de controle;
 - Testes de comunicação com os dispositivos de campo;
 - Testes de segurança;
- Treinamentos para os usuários que ficarão responsáveis pela operação e manutenção do sistema depois de entregue.

O start-up e comissionamento vêm logo em seguida, consistindo na integração completa entre o sistema de controle, redes de comunicação, sistemas auxiliares e dispositivos de campo. Este passo precisa ser muito bem planejado e organizado, preferencialmente de forma sequencial e utilizando um procedimento formal.

Após a realização do start-up é realizado um passo de conclusão onde os documentos do projeto são atualizados conforme a situação real após as modificações adequações decorrentes da implantação (*as-built*). Estes documentos são então agrupados em uma pasta e entregues ao cliente como uma formalização da conclusão e aceite do projeto.

² Do inglês *Functional (or Factory) Acceptance Test*

2.1.6 Suporte e operação assistida

Apesar de concluída a implantação do sistema e a entrega oficial ao usuário final, existe ainda uma etapa de suporte e operação assistida. Isto porque a solução recentemente implantada pode gerar dúvidas quanto a sua operação ou mesmo apresentar quedas de desempenho. Sendo assim, nesta etapa estão previstas atividades como:

- Monitoração contínua do desempenho do sistema;
- Suporte à operação, configuração e manutenção do sistema;
- Treinamento de novas equipes de usuários;
- Inspeções periódicas e testes de re-validação do sistema;
- Atualização da documentação, incluindo lições aprendidas;
- Elaboração de uma lista de sobressalentes recomendados;
- Elaboração de um plano de gerenciamento do sistema;
- Elaboração de um plano de gerenciamento de mudanças no sistema;

2.2 Modelo FEL (Front-End-Loading)

A metodologia FEL (*Front End Loading*), desenvolvida pela IPA (*Independent Projects Analysis*), empresa especializada em gestão de projetos, consiste em um processo para o desenvolvimento de projetos que se baseia na gradual e adequada definição do empreendimento. Para tanto, considera a identificação dos recursos humanos e materiais necessários e a integração de disciplinas como engenharia, meio ambiente, saúde e segurança, entre outras, buscando o comprometimento das partes interessadas, antes que a construção do projeto seja autorizada (VALE, 2010).

Diferentemente do Modelo da ISA, o modelo FEL é mais amplo e não se restringe a projetos de sistemas de controle e automação.

A metodologia FEL define o ciclo de vida do projeto em 3 fases: Desenvolvimento, Execução e Operação (*Independent Project Analysis*, 2010). A fase de Desenvolvimento é dividida ainda em três estágios. A saber:

- FEL 1 – Análise do Negócio;
- FEL 2 – Desenvolvimento do Escopo;
- FEL 3 – Planejamento da Implantação.

As transições de um estágio para o outro são denominadas *gates* ou “portões de passagem”. Estes *gates* representam pontos de tomada de decisão quanto à aprovação do projeto para a próxima fase, retorno para melhor definição, ou cancelamento.

A Figura 3 apresenta o esquemático do modelo FEL.

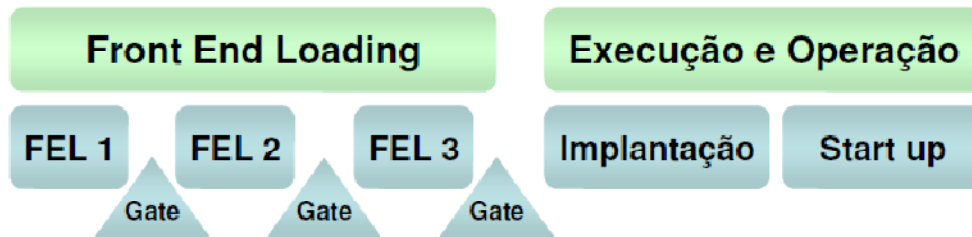


Figura 3 – Ciclo de Vida do Projeto segundo o IPA (Santiago et al, 2008)

Nos itens que se seguem são descritos de forma resumida os três estágios da Fase de Desenvolvimento, bem como as fases de Execução e Operação.

2.2.1 FEL 1 – Análise do Negócio

Consiste em identificar, desenvolver e avaliar a oportunidade de investimento por meio da análise da atratividade do negócio.

Inclui uma avaliação técnica, o desenvolvimento de um cronograma alto-nível contendo os possíveis marcos (*milestones*) do projeto, e o desenvolvimento de uma faixa estimada dos custos (tipicamente com uma tolerância de -25/+40% de imprecisão).

À medida em que o projeto vai sendo melhor definido, um plano de negócios pode ser elaborado. Em paralelo, uma análise econômico-financeira pode ser conduzida de forma a avaliar o potencial do projeto sob o ponto de vista da produção e da estratégia em geral da companhia.

2.2.2 FEL 2 – Desenvolvimento do Escopo

O início deste estágio é marcado pela formação da equipe do projeto. Esta equipe irá iniciar o desenvolvimento dos objetivos de negócio e escopo das alternativas identificadas em FEL 1.

O produto chave a ser entregue ao final do FEL 2 é a escolha de uma única alternativa que maximize o valor para o empreendimento e para a organização.

Além de selecionar uma única alternativa, é importante anexar a esta alternativa as seguintes informações de forma que o próximo estágio possa ser cumprido de forma efetiva:

- Objetivos do projeto;
- Documentos da Engenharia Conceitual e Básica;
- Diagramas funcionais;
- Estimativas de custo ($\pm 30\%$ de incerteza);
- Compromisso das partes envolvidas com a alternativa selecionada.

O fim do FEL 2 se dá quando uma alternativa é selecionada e a liderança do negócio decide investir no detalhamento do escopo do projeto, desenvolvimento do cronograma e aprimoramento das estimativas de custo e benefício.

2.2.3 FEL 3 – Planejamento da Implantação

Neste estágio, a alternativa selecionada em FEL 2 é aprofundada com o objetivo de planejar a execução do empreendimento e confirmar o atendimento aos objetivos do projeto e do negócio.

Durante a etapa a equipe do projeto tende a crescer devido ao aumento das atividades de engenharia a serem conduzidas antes da autorização formal do projeto.

O principal objetivo do FEL 3 é o desenvolvimento de um conjunto de documentos que compõem o plano para a execução do projeto. Mais especificamente, os produtos da etapa são:

- Diagramas P&I;
- Especificações de equipamentos;
- Plano de aquisições;
- Escopo detalhado;
- Cronograma detalhado;

Este conjunto de documentos deve permitir que uma nova e mais confiável rodada de estimativas de custo e duração seja feita. Tipicamente neste estágio trabalha-se com uma imprecisão não superior a 20% em tais estimativas.

O FEL 3 termina quando o projeto é oficialmente autorizado e a equipe recebe os fundos necessários para seguir com a engenharia detalhada e a execução.

2.2.4 Execução

A Fase de Execução é definida pela IPA como sendo o período que vai desde o início da engenharia detalhada até o final da implantação/construção.

O projeto detalhado consiste na elaboração, a partir das informações resultantes do projeto básico e dos desenhos de fornecedores (FEL 3), de todas as atividades e dos documentos finais de engenharia que permitam a execução dos serviços de fabricação, construção e montagem, pré-operação e operação de todos os itens que compõem o empreendimento. Os documentos produzidos nesta etapa terão nível de detalhe suficiente para a completa execução de todas as atividades de campo necessárias à implantação do empreendimento e conterão os subsídios necessários ao gerenciamento da implantação.

A Fase de Execução é considerada terminada quando o projeto está fisicamente completo e a equipe do projeto está transferindo a responsabilidade para os membros da equipe de *start-up*.

2.2.5 Operação

A Fase de Operação inclui todas as atividades de *start-up* que compreendem o período que vai desde a conclusão da implantação física, passando pela implementação da parte lógica e culminando na operação do sistema em regime permanente.

À medida que o sistema vai entrando em regime, boa parte da equipe começa a ser desmobilizada, restando apenas os profissionais que irão conduzir a operação assistida – atividade que marca a transição gradual de controle sobre o sistema entre a empresa prestadora de serviço e a empresa contratante por meio de seus operadores.

É neste momento também que é realizada uma das atividades mais importantes do projeto e que por muitas vezes acaba sendo deixada em segundo plano. Trata-se da Engenharia “as built”, que consiste na adequação de todos os documentos de projeto elaborados na etapa de engenharia detalhada, à real situação implantada.

2.3 Comentários Finais

O conceito de ciclo de vida de um projeto foi discutido. Direcionando um pouco mais o foco para projetos de engenharia e mais especificamente projetos de automação e controle, foram descritos os dois modelos de ciclo de vida mais comumente utilizados em projetos desta natureza: Modelo ISA e Modelo FEL. Tais modelos se diferenciam

nos detalhes, porém são semelhantes em sua essência. Ambos estabelecem como fase inicial de um projeto a análise de viabilidade do empreendimento.

O próximo capítulo vai um pouco mais além na descrição desta fase particular, apresentando os principais objetivos que devem ser traçados, os elementos que compõe os custos do empreendimento e as ferramentas que podem auxiliar nesta análise quantitativa de viabilidade.

3 ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PROJETOS

Como pôde ser observado nos modelos de ciclo de vida de projeto apresentados nos itens 2.1 e 2.2, a análise de viabilidade deve ser a etapa inicial de um projeto de automação e controle típico. O objetivo principal desta análise é o de confrontar o esforço a ser despendido com o projeto (investimento financeiro, mão-de-obra, matéria-prima, aquisições, etc...) com o seu potencial retorno sob o ponto de vista dos objetivos de negócio da companhia. A viabilidade ou inviabilidade do projeto será declarada de acordo com o resultado deste confronto.

Visando detalhar melhor os fatores a serem considerados durante a análise de viabilidade de um projeto de automação e controle, os próximos dois itens descrevem os principais direcionadores de negócio tomados como referência, além dos investimentos típicos associados a um empreendimento desta natureza.

Já o item 3.3 apresenta algumas ferramentas consolidadas para aplicação na análise de viabilidade sob o ponto de vista financeiro, após os impactos nos direcionadores de negócio e os investimentos e custos terem sido devidamente mapeados e quantificados.

3.1 Direcionadores de negócio

Entende-se por direcionadores de negócio³ os objetivos ou metas que representam o foco estratégico da organização na condução do seu negócio (Shunta, 1995). Tais direcionadores de negócio podem variar de um segmento industrial para outro e podem também ser dinâmicos no tempo, acompanhando as tendências mais fortes de mercado. Por exemplo, em tempos de baixa demanda de produtos, o custo operacional da empresa passa a ter uma relevância mais alta do que o volume de produção em si.

Consideram-se como os principais direcionadores, embora outros possam ser definidos de acordo com cada segmento industrial (Friedmann, 2006):

- **Volume de produção** – mede a quantidade de produtos gerados dentro de um determinado período de referência. Em geral este indicador é utilizado para medir a capacidade da unidade ou complexo de suprir a demanda pelos seus produtos;

³ Ao longo do texto é também utilizado o termo “indicadores” como um sinônimo para “direcionadores”.

- **Taxa de produção ou produtividade** – mede a quantidade de produto gerado por unidade de tempo. De certa forma este indicador reflete o nível de maturidade tecnológica dos equipamentos da companhia ou mesmo as condições físicas da planta; também pode ser utilizado para inferir sobre a capacidade de atender a demanda pelos seus produtos;
- **Custo operacional** – é a soma dos custos que incidem sobre a operação da planta. Geralmente este indicador é composto pelo custo dos insumos e matérias primas utilizados na produção, custo de mão-de-obra e serviços, custo de energia elétrica e demais utilidades, custo de manutenção, custo associado a perdas de produção e materiais de descarte, entre outros;
- **Consumo energético específico** – mede a quantidade de energia (elétrica, térmica ou nuclear) consumida por volume de produto gerado. Nos tempos atuais este tem sido um direcionador de negócio muito presente nas companhias não só pela questão do custo energético mas também pela questão da responsabilidade social e preservação das fontes energéticas do planeta.
- **Disponibilidade** – mede o percentual do tempo dentro de um período pré-determinado em que a planta esteve disponível para operar, ou seja, livre de falhas ou manutenção. Este indicador está intimamente ligado ao volume de produção uma vez que, em geral, quanto maior a disponibilidade dos equipamentos maior o tempo em que a planta esteve produzindo. Um termo em inglês muito utilizado para este direcionador de negócio é *downtime*⁴.
- **Qualidade** – conjunto de indicadores utilizados para avaliar se as saídas finais e intermediárias do processo atendem aos requisitos de qualidade especificados pelas unidades consumidoras; a qualidade tem forte interação com os indicadores de custo operacional uma vez que um produto não-conforme representa custo sem geração de receita.
- **Meio ambiente** – mede o nível de impacto ao meio ambiente decorrente do processo produtivo da companhia. Direcionador de negócio que vem ganhando forte apelo nos últimos anos e que vem sendo aprimorado, por

⁴ Neste caso o indicador mediria o inverso da disponibilidade, ou seja, o percentual do tempo em que a planta esteve indisponível para operar devido a falhas ou rotinas de manutenção.

exemplo, pelo controle de emissões atmosféricas e da utilização de fontes de energia renováveis e não-poluidoras.

- **Segurança e saúde operacional** – mede a incidência de eventos que atentam contra a segurança e a saúde de funcionários e prestadores de serviço. Em geral este é dado como o direcionador número um de todas as companhias pois eventos como esse, além de atentar contra a saúde e segurança dos funcionários, podem causar graves prejuízos à imagem da mesma e gerar uma série de inconvenientes junto aos órgãos fiscalizadores, sindicatos e opinião pública;

Como foi explicitado em algumas partes do texto acima, pode existir uma forte interação entre alguns indicadores de negócio, uns afetando diretamente os resultados de outros.

3.1.1 A influência da automação

Por se tratarem de indicadores de alto nível, muitas vezes não é clara a influência que empreendimentos de automação e controle podem exercer sobre os indicadores de negócio.

Esta secção visa dar alguns exemplos de forma a ilustrar a conexão existente entre as ações no chão de fábrica sob o ponto de vista da automação e a sua repercussão nos indicadores corporativos.

O exemplo da Figura 4 apresenta o gráfico de tendência de uma malha de controle de temperatura de um forno siderúrgico.



Figura 4 – Gráfico de tendência de uma malha de controle de temperatura

Este forno passou por um processo de melhoria nos seus controles visando a redução nas oscilações de temperatura da Zona 1. Após algumas alterações na estratégia de controle e na sintonia das malhas, foi visível a redução nas oscilações (em destaque na figura) e também a redução do esforço de controle.

Ao reduzir as oscilações de temperatura do forno e, conseqüentemente, a variabilidade de seu controle, este passa a operar de forma mais estável e com uma maior eficiência energética, demandando menos combustível para manter a temperatura desejada. Por sua vez, uma menor demanda de combustível influencia diretamente nos indicadores de custo da companhia no longo prazo. Esse raciocínio é ilustrado pela Figura 5.

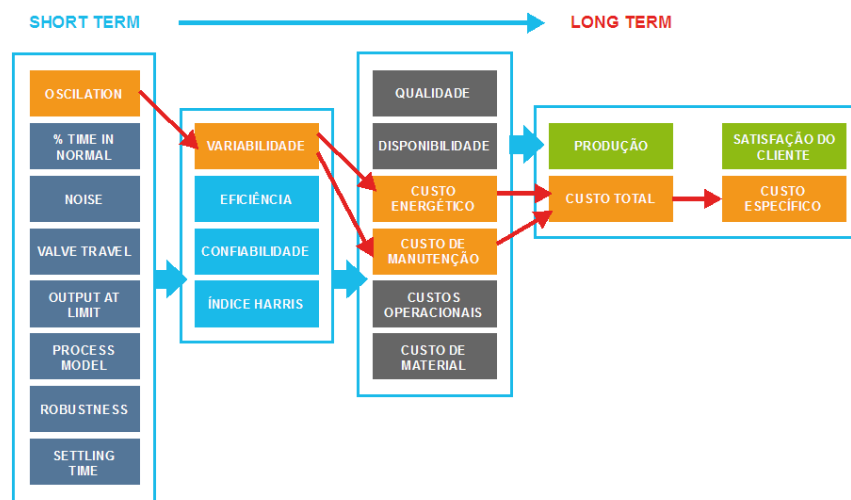


Figura 5 – Associação lógica de indicadores de curto prazo com indicadores estratégicos de longo prazo

Já o exemplo da Figura 6 apresenta o gráfico de tendência de uma malha de vazão de gás controlada por válvula. Mais uma vez, após algumas ações de melhoria no controle da malha, ocorreu uma redução nas oscilações de vazão e, principalmente, uma redução significativa no esforço de controle representado pelas excursões da válvula.

Ao reduzir as excursões da válvula, reduz-se o desgaste dos elementos móveis deste equipamento, aumentando a sua confiabilidade e sua vida útil e reduzindo a chance de falhas. Por sua vez, tal redução na incidência de falhas leva a uma queda na demanda por manutenção e a um aumento da disponibilidade da planta. Maior a disponibilidade, maior o volume de produção e melhor o atendimento à demanda externa. É o que mostra o diagrama da Figura 7.

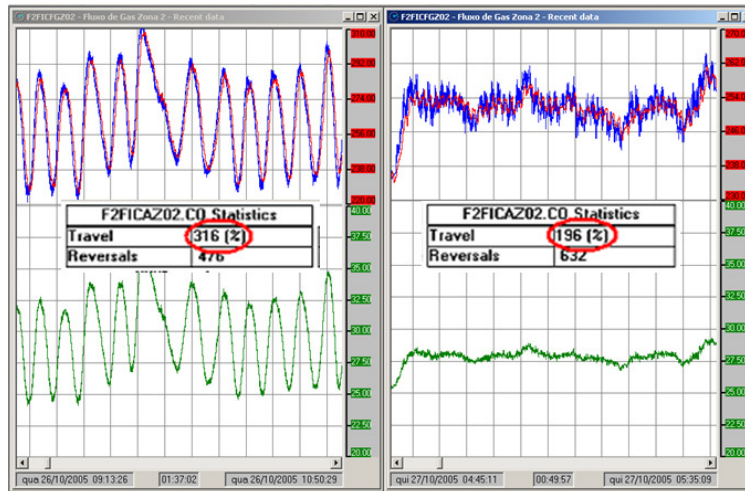


Figura 6 – Gráfico de tendência de uma malha de controle de vazão

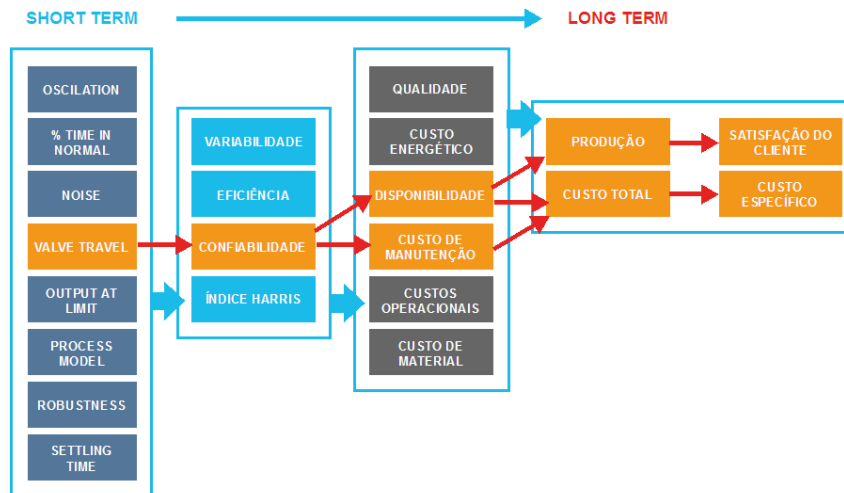


Figura 7 - Associação lógica de indicadores de curto prazo com indicadores estratégicos de longo prazo

Assim como se procurou evidenciar nos dois exemplos anteriores, para cada direcionador de negócio apresentado na secção 3.1 é possível estabelecer algum tipo de conexão com atividades de curto prazo relacionadas à automação e controle. Sendo que, ações que promovem a redução na variabilidade do processo geralmente são aquelas capazes de influenciar um maior número de indicadores de negócio. Isso porque redução de variabilidade implica em aumento de controle sobre o processo, e quando se tem mais controle sobre o processo fica mais fácil de deslocá-lo para pontos de operação mais próximos das metas de negócio (*throughput*, produtividade, disponibilidade,...) e, ainda assim, respeitando as restrições impostas por outros objetivos estratégicos (qualidade, meio ambiente e segurança). É o que mostra o

esquemático da Figura 8 onde, no período antes das melhorias, as fortes oscilações na variável de processo (PV) faziam com que a média de operação tivesse que manter uma certa distância em relação à restrição (por razões de segurança, por exemplo). Depois de realizadas as melhorias no controle e já com o nível de variabilidade reduzido, o ponto operacional pode ser deslocado para mais próximo da restrição, o que significa estar mais próximo do ponto de maior eficiência e capacidade produtiva.

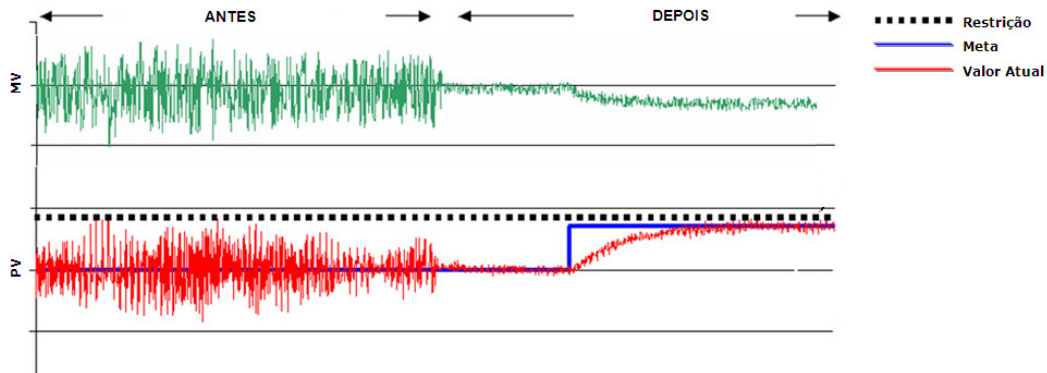


Figura 8 - Benefícios da redução de variabilidade

3.2 Investimento

Enquanto os benefícios decorrentes do controle de processos vêm sendo estudados cada vez em maiores detalhes, ainda há pouca informação acerca dos custos encontrados ao se implementar um novo sistema de controle e automação (Bauer; Craig, 2008).

Na prática, os itens que compõem o investimento total de um determinado projeto de automação e controle podem ser divididos em três categorias: equipamentos, softwares e serviços.

As figuras 9, 10 e 11 apresentam a composição típica de cada uma destas categorias de investimento.

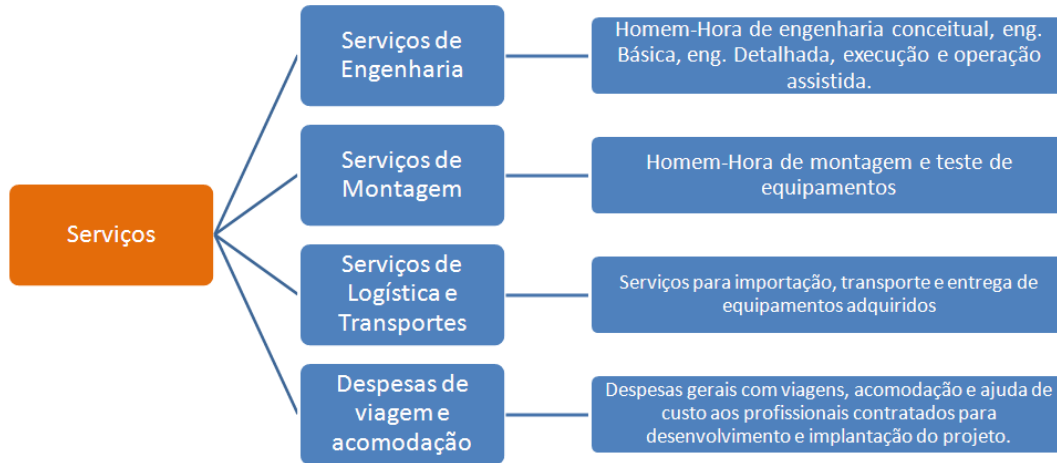


Figura 9 – Composição do investimento de um projeto - Serviços

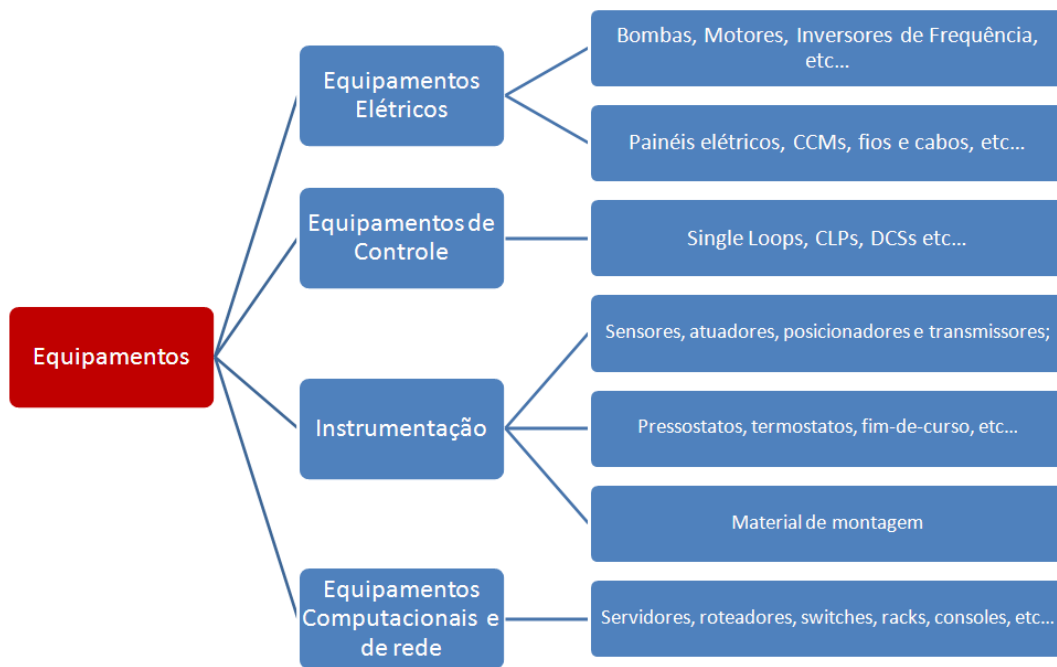


Figura 10 - Composição do investimento de um projeto - Equipamentos

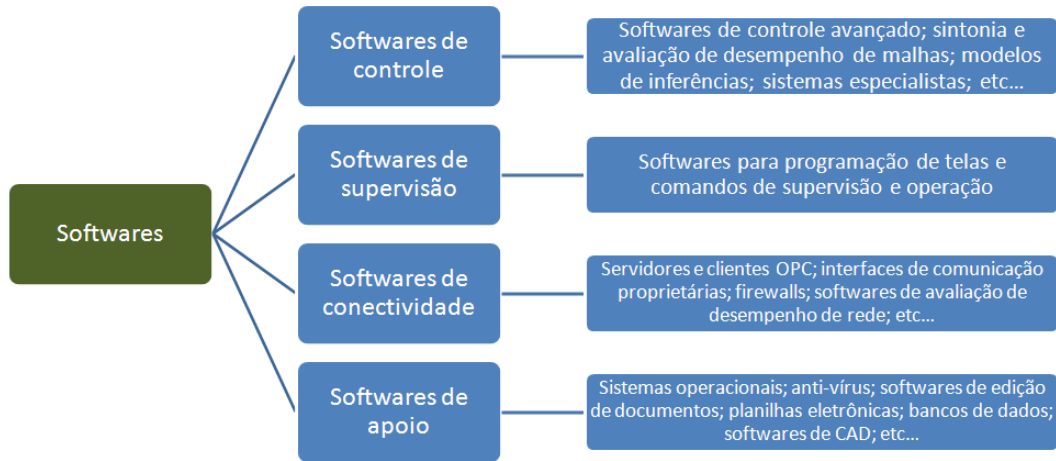


Figura 11 - Composição do investimento de um projeto - Softwares

A distribuição do investimento ao longo destas três categorias depende muito da natureza específica do projeto. Projetos envolvendo aquisição de equipamentos tendem a ter concentrada a maior parte do investimento nestas aquisições. Por outro lado, projetos como a implantação de um sistema de controle avançado de processos têm seus custos mais elevados associados às horas de engenharia de consultores experientes. É como mostra o gráfico da Figura 12 contendo o resultado da pesquisa realizada por Bauer e Craig (2008) envolvendo usuários e fornecedores de tecnologia APC (*Advanced Process Control*).

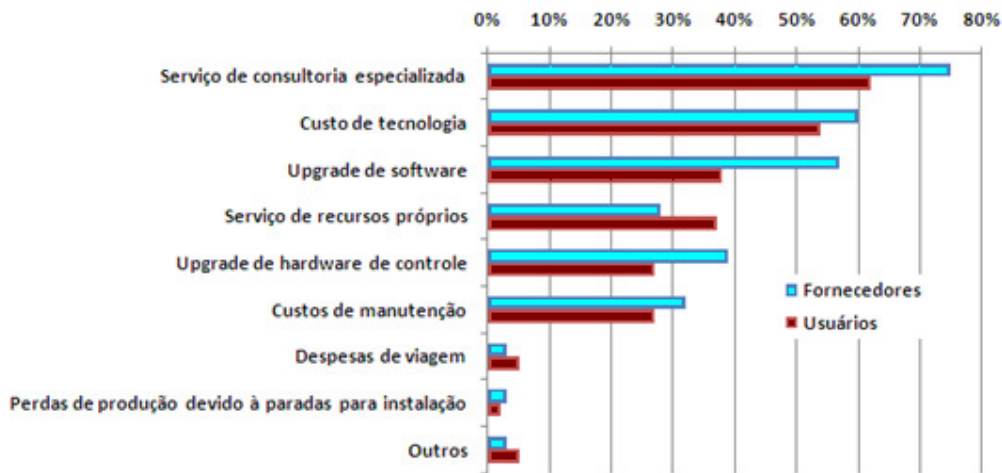


Figura 12 – Principais elementos de custo em projetos de controle avançado – resultados da pesquisa (Bauer; Craig, 2008)

Ressalta-se novamente aqui a importância de se ter tais informações de custo disponíveis, pois só assim é possível confrontá-los com o ganho estimado do projeto e inferir sobre a viabilidade do mesmo.

3.3 Ferramentas de análise financeira

Hayes (2004) apresenta diversas técnicas que podem ser aplicadas para análise de viabilidade financeira de um empreendimento. Dentre estas técnicas, as mais comumente utilizadas são:

- Valor Presente
- Valor Presente Líquido
- Taxa Interna de Retorno (TIR)
- Retorno contábil sobre o investimento
- Período de *payback* do investimento

As seções seguintes descrevem em mais detalhes cada uma destas técnicas.

3.3.1 Valor Presente

A técnica do Valor Presente é aquela que permite avaliar qual a correspondência no tempo presente de um valor monetário projetado para o futuro. Para tanto, ao valor monetário futuro é aplicada uma taxa de desconto por período até que se encontre o valor presente correspondente, como mostra a Equação 3-1:

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^n} \quad \text{Equação 3-1}$$

Onde VP é o valor presente, VF é o valor futuro, i é a taxa de desconto e n é o número de períodos de tempo.

Como um exemplo, suponha-se que um determinado projeto foi avaliado com um ganho potencial de R\$800.000,00 a ser recuperado 2 anos após a implantação do projeto. Para saber o Valor Presente de tal retorno projetado para o futuro, assumindo uma taxa de 10% a.a, aplica-se:

$$VP = \frac{800000}{(1+0,1)^2} = 661157 \quad \text{Equação 3-2}$$

Ou seja, o ganho potencial de R\$800.000,00 projetado para dois anos à frente, representa, no tempo presente, um ganho de:

R\$ 661.157,00

3.3.2 Valor Presente Líquido

A técnica do Valor Presente Líquido (VPL) é muito semelhante à técnica do Valor Presente. A diferença está no fato de que o Valor Presente Líquido é calculado descontando-se qualquer custo inicial de investimento que possa incorrer no empreendimento em análise.

Para ilustrar este conceito pode-se utilizar o mesmo exemplo utilizado no item 3.3.1. Entretanto, para um maior entendimento, suponha-se que:

- O ganho potencial de R\$800.000,00 seja representando pela soma de um ganho de R\$400,000,00 no primeiro ano com o mesmo valor de ganho no segundo ano;
- O custo inicial de investimento no projeto foi orçado em R\$500.000,00.

Utilizando uma tabela simples de fluxo de caixa (Tabela 1), com os valores em milhares de reais, tem-se:

Tabela 1 – Fluxo de caixa simples

Ano	0	1	2
Fluxo de Caixa	-500	+400	+400

Para encontrar o valor presente líquido do fluxo de caixa deste projeto é necessário descobrir o valor presente de cada um dos fluxos de caixa positivos descontados da taxa de 10% para o número adequado de anos. Somando-se os valores presentes encontrados e subtraindo-se desta soma o valor do fluxo de caixa negativo (R\$250.000,00) tem-se o VPL do empreendimento. Esse cálculo é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Cálculo do VPL do empreendimento

	Fluxo de Caixa (em R\$1.000)	VP (em R\$1.000)
Ano 0	-500	-500
Ano 1	+400	$= \frac{400}{(1+0,1)^1} = 363,63$
Ano 2	+400	$= \frac{400}{(1+0,1)^2} = 330,58$
Total		= 194,21

Ou seja, o Valor Presente Líquido deste empreendimento é de R\$194.210,00.

Sendo o VPL positivo e não havendo outros custos associados ao empreendimento, o mesmo pode ser considerado economicamente viável.

3.3.3 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto i que, se aplicada, faz o Valor Presente Líquido do empreendimento se igualar à zero. É uma espécie de taxa de desconto limite a partir da qual o empreendimento passa a não ser mais viável.

O cálculo da TIR se baseia na mesma equação utilizada para o cálculo do valor presente líquido (Equação 3-1) só que, neste caso, a equação resolve a taxa de desconto.

A análise de viabilidade a partir da TIR é feita comparando-se o seu valor com outro valor de referência que pode ser tanto o custo de oportunidade ou a *taxa de atratividade*. Entende-se por custo de oportunidade o retorno esperado sobre um investimento equivalente e por *taxa de atratividade* uma taxa mínima estabelecida geralmente pela direção da empresa acima da qual todo empreendimento pode ser considerado atrativo.

Em resumo, o projeto será considerado viável em um dos dois casos, de acordo com a política da empresa: $TIR > \text{custo de oportunidade}$ e/ou $TIR > \text{taxa de atratividade}$.

Para o exemplo descrito no item 3.3.2, o valor da TIR seria de 38% a.a. Isso implica em dizer que, a não ser que a companhia possua outras modalidades de investimento cujo rendimento seja superior a 38% a.a., o projeto é economicamente viável.

Importante ressaltar, no entanto, que certas modalidades de investimento oferecem menores taxas de rendimento mas podem também oferecer menores níveis de risco do que certos projetos com taxa de rendimento elevada.

3.3.4 Retorno contábil sobre o investimento (ROI)

O retorno contábil sobre o investimento nada mais é do que a relação entre o retorno líquido de um investimento (ou lucro líquido) e o custo total do investimento.

$$ROI(\%) = \frac{\text{Receita} - \text{Custo}}{\text{Custo}} = \frac{\text{Receita}}{\text{Custo}} - 1 \quad \text{Equação 3-3}$$

No exemplo do item 3.3.2, o cálculo do ROI seria o seguinte:

$$ROI = \frac{800.000 - 500.000}{500.000} = \frac{800.000}{500.000} - 1 = 60\% \quad \text{Equação 3-4}$$

A utilidade do ROI como ferramenta para análise de viabilidade é muito limitada. Isso se dá devido a duas razões principais: o fato de não levar em consideração o valor do dinheiro no tempo (como é o caso da VPL e TIR); e o fato de não ter embutida em si uma noção dos riscos associados ao empreendimento. Em outras palavras, para se comparar dois empreendimentos utilizando o ROI é necessário se ter uma noção do nível de risco de cada um. Para projetos de maior risco, espera-se um maior retorno contábil e vice-versa.

3.3.5 Período de *payback* do investimento

O período de *payback* ou recuperação de um investimento é o tempo que transcorrerá até que o retorno do investimento se iguale aos custos incorridos. Para calcular o *payback* basta dividir o custo total do investimento pelos retornos periódicos esperados com o projeto.

$$Payback(\text{unid. tempo.}) = \frac{\text{Custo}_{\text{Investimento}}}{\text{Receita}_{\text{por}_{\text{período}}}} \quad \text{Equação 3-5}$$

No exemplo do item 3.3.2, o cálculo do *Payback* seria o seguinte:

$$Payback(\text{em}_{\text{anos}}) = \frac{500.000}{400.000} = 1,25 \quad \text{Equação 3-6}$$

Ou seja, o projeto se pagaria em 1 ano e três meses.

Para decidir sobre a viabilidade do empreendimento sob a ótica deste indicador é necessário conhecer a meta de *payback* da empresa. Essa meta pode variar de segmento para segmento e pode variar também em função da conjuntura econômica corrente.

3.4 Comentários Finais

Neste capítulo foi explorada em mais detalhes a fase de análise de viabilidade de um projeto de automação e controle. Foram apresentados os fatores a serem considerados durante tal análise e que funcionam como dois pesos em uma balança. De um lado os custos e investimentos típicos associados a um empreendimento desta natureza; de outro o impacto positivo que o projeto exerce sobre os direcionadores do negócio.

Para falar dos impactos nos direcionadores de negócio, procurou-se deixar clara por meio de exemplos a influência que ações de curto-prazo realizadas no nível do chão-de-fábrica têm sobre os indicadores de longo prazo e estratégicos da companhia.

Ao final foram apresentadas as ferramentas e técnicas de análise financeira que ajudam a projetar os números deste confronto custo/benefício.

Entende-se, no entanto, que cada vez mais este processo de análise de viabilidade precisa ser o menos subjetivo e o mais independente possível. Para tal é inevitável sistematizar as atividades envolvidas no processo e criar alternativas para tratar os diferentes tipos de informações. Não há dúvidas de que o maior desafio neste caso é o de se estimar com consistência os benefícios que podem ser trazidos pelo projeto. São muitas as incertezas envolvidas.

O próximo capítulo descreve a metodologia que está sendo proposta para a condução desta estimação de benefícios. Indo ao encontro do que foi colocado nos parágrafos anteriores, a metodologia visa não só sistematizar o processo de estimação de benefícios como também aumentar a consistência e precisão dos resultados.

4 PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ESTIMAÇÃO DE GANHOS FINANCEIROS EM PROJETOS DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE

No capítulo anterior ficou claro o importante papel desempenhado pela etapa de análise de viabilidade dentro do ciclo de vida de um projeto de engenharia. Ficou clara também a estreita relação que existe entre as ações desempenhadas no chão-de-fábrica e os direcionadores de negócio da companhia. Dada a importância de tais temas, a demanda por uma sistematização do processo de análise de viabilidade e análise de impacto é naturalmente crescente. Em outras palavras, quanto mais robusto, sistemático e abrangente for o método que dá suporte a esta etapa do ciclo de vida do projeto, mais segura é a decisão sobre prosseguir ou não com determinado empreendimento.

O presente capítulo traz consigo a principal contribuição deste trabalho. Aqui é descrita a metodologia proposta para se estimar ganhos em projetos de automação e controle, e inferir sobre a sua viabilidade financeira. Tudo isso baseado principalmente nas ações a serem empreendidas e no comportamento histórico do processo alvo. São ao todo seis passos que vão desde o entendimento dos objetivos do projeto e do negócio, passando pela análise de dados históricos, até culminar na análise de viabilidade financeira do empreendimento, confrontando-se o benefício estimado com os custos envolvidos. Os seis passos são apresentados na Figura 13, uma visão geral da proposta metodológica.

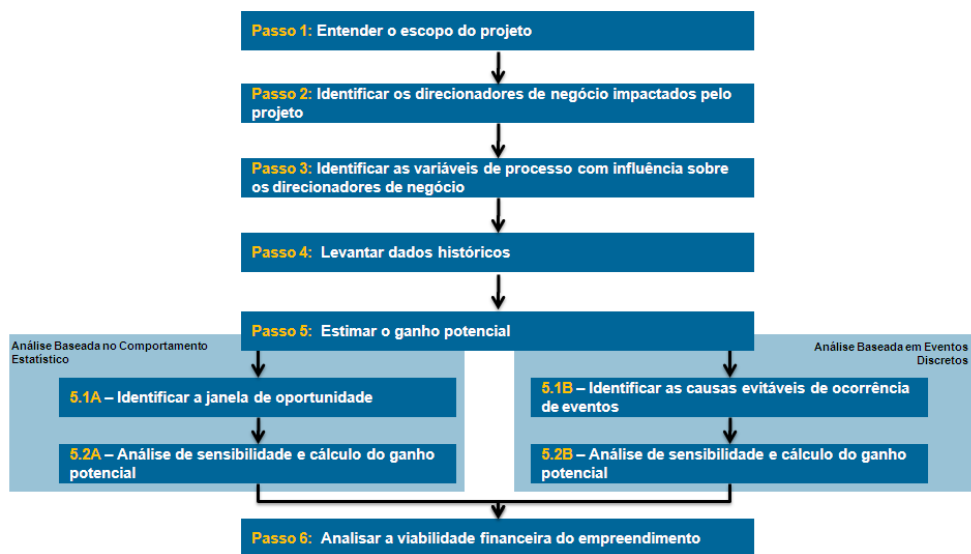


Figura 13 – Visão geral da metodologia

A metodologia proposta resulta da combinação de três elementos principais:

- Conceitos da literatura – como o método descrito por Shunta (1995).
- Boas práticas das empresas de engenharia consultiva;
- Contribuições do autor.

Procurou-se agregar aspectos práticos no tratamento dos dados históricos e novas alternativas para análise de impacto nos direcionadores de negócio. Além disso, incluiu-se o passo de análise de viabilidade econômica com suas respectivas ferramentas de cálculo.

As seções 4.1 à 4.6 descrevem em detalhes cada um dos passos propostos, apresentando exemplos quando necessário para ilustrar a sistemática.

4.1 Passo 1 – Entender o escopo do projeto

Este primeiro passo tem como objetivo o de identificar o limite de escopo do projeto em análise. Isto porque, para se ter uma correta noção da amplitude dos ganhos a serem estimados, é necessário primeiramente conhecer a natureza do projeto; o seu alcance em termos de equipamentos, operações unitárias, unidades ou plantas envolvidas; e o seu alcance em termos dos níveis de automação empregados.

Algumas perguntas que podem auxiliar no melhor entendimento do escopo do projeto são:

- Qual o título do projeto?
- Qual a justificativa e a motivação do projeto?
- Qual(is) o(s) objetivo(s) final(is) do projeto?
- Qual a abordagem/metodologia de desenvolvimento do projeto?
- Qual(is) a(s) área(s) física(s) da empresa envolvida(s) (complexo, unidade industrial, área operacional, operação unitária, equipamento)?
- Qual(is) o(s) nível(is) de atuação do projeto (instrumentação, controle e supervisão, controle avançado ou sistemas especialistas)?
- Qual(is) a(s) variável(is) de negócio impactada(s)? Como?
- Quais as variáveis de processo que têm influência na(s) variável(is) de negócio identificada(s)?
- Qual o prazo de implantação do projeto?
- Qual a estimativa de orçamento do projeto (inclui materiais, serviços, aquisições, subcontratações, etc...)?

- Qual são os custos operacionais incorridos durante a fase de implantação do projeto (ex.: necessidade de paradas de produção, necessidade de aumento de jornada de trabalho, etc)?

Respondidas estas perguntas, pode-se ter uma boa noção da dimensão do projeto e dos impactos que se espera trazer para a organização em termos de mudanças operacionais e, naturalmente, de resultados de negócio.

4.2 Passo 2 – Identificar os direcionadores de negócio impactados pelo projeto

Dentro do contexto desta proposta metodológica, a identificação dos direcionadores de negócio impactados pelo projeto é um passo importante uma vez que é nesses direcionadores que os ganhos quantitativos vão se refletir.

Para cada projeto, é possível que mais de um direcionador de negócio seja identificado. Na secção 3.1 foi apresentada uma lista com os direcionadores mais comuns.

Tal tarefa de identificação deve ser preferencialmente realizada por meio de *workshops* ou entrevistas com representantes da companhia que tenham algum tipo de participação nas questões estratégicas da empresa.

Ao longo deste documento, utilizar-se-á o termo “variáveis de negócio” como uma referência àquelas variáveis ou indicadores que tenham associação direta ou mesmo que sejam utilizadas para se medir e quantificar um direcionador de negócio.

4.3 Passo 3 – Identificar as variáveis de processo que têm influência sobre os direcionadores de negócio

Para cada direcionador de negócio identificado no passo anterior é necessário identificar as variáveis de processo ou de qualidade (contínuas ou discretas) que estão associadas àqueles direcionadores. Os exemplos abaixo ilustram melhor esta associação:

Exemplo 1: O escopo do projeto contempla a otimização de um forno siderúrgico onde o principal direcionador de negócio identificado é a redução do consumo de combustíveis. Neste caso podem-se considerar como variáveis de processo associadas, entre outras, a temperatura do forno, a vazão de combustível, a vazão de ar de combustão e a relação ar/combustível.

Exemplo 2: O escopo do projeto contempla a automação de uma linha de peneiramento em uma planta de beneficiamento mineral e um dos direcionadores de negócio identificados é o aumento de produtividade da linha. Neste caso, podem-se, por exemplo, considerar como variáveis de processo associadas a vazão de alimentação da linha, a corrente elétrica das peneiras (condição de carga) e, também, a ocorrência e a duração de paradas na linha.

Exemplo 3: O escopo do projeto contempla a sintonia das malhas de controle da região de resfriamento de uma unidade de lingotamento contínuo e um dos direcionadores de negócio identificados é a redução de custos por lingote rejeitado ou re-processado. Neste caso, exemplos de variáveis associadas são: vazões de água de resfriamento, pressões de água de resfriamento, número de peças recusadas e número de peças desviadas para re-trabalho.

Antes de passar para o próximo passo é muito importante se confrontar o escopo do projeto com as variáveis de processo identificadas. Isso porque, dependendo da abrangência do escopo, nem todas as variáveis identificadas sofrerão impacto do projeto. Tal informação é fundamental para a análise de sensibilidade presente no Passo 5 da metodologia (secção 4.5.1.2).

4.4 Passo 4 – Levantar dados

Identificados os direcionadores de negócio e as variáveis de processo/qualidade associadas, o próximo passo é a coleta de dados históricos referentes a tais indicadores e variáveis.

Com os sistemas de informação e gerenciamento da produção disponíveis hoje na maioria das indústrias, esta tarefa de coleta de dados históricos ficou bastante facilitada. Entretanto, alguns cuidados ainda devem ser tomados ao se realizar tal tarefa. Tais cuidados dizem respeito aos seguintes fatores:

- Confiabilidade dos dados – para qualquer informação de processo ou qualidade a ser analisada é importante se certificar de que o instrumento de medição está funcionando em boas condições e oferecendo medidas confiáveis. Além disso, para informações provenientes de cálculos matemáticos, faz-se necessário investigar se a fórmula está sendo aplicada corretamente e se está considerando os atrasos de tempo entre parâmetros adequadamente.

- Freqüência de amostragem – a freqüência de amostragem dos dados deve ser coerente com o comportamento dinâmico das variáveis que estão sendo representadas por eles. Se este não for o caso, é necessária uma intervenção de forma a aumentar a freqüência de amostragem daquela variável.
- Horizonte de análise (janela de tempo) – Deve-se procurar selecionar uma janela de dados em que os indicadores e variáveis de processo/qualidade estiveram sujeitos apenas a variações ordinárias de operação e processo. Em outras palavras, deve-se evitar selecionar períodos em que tenha havido grandes mudanças estruturais (repotenciamento de linha, substituição de equipamentos, etc) ou grandes mudanças operacionais (substituição de matéria prima, substituição de combustíveis, aumento de jornada de trabalho, efeitos sazonais, etc). Tais mudanças podem mascarar as análises de cenários antes/depois uma vez que alteram a base de referência de desempenho.

4.5 Passo 5 – Estimar o ganho potencial

O ganho potencial que está atrelado a um dado projeto pode decorrer de duas transformações principais trazidas pelo empreendimento: uma mudança no comportamento estatístico das variáveis de interesse; e/ou uma redução na ocorrência de certos eventos operacionais indesejáveis (Friedmann, 2006).

Dadas as características distintas de tais tipos de transformação (que vão desde o tratamento dos dados até a forma de interpretação dos resultados), faz-se necessária a definição de métodos também distintos para se estimar o ganho potencial em cada uma das ocasiões. Importante mencionar que um mesmo projeto pode impactar tanto no comportamento estatístico quando nos eventos operacionais discretos da planta.

Os itens 4.5.1 e 4.5.1.2.4 apresentam, respectivamente, a proposta metodológica para cálculo do ganho potencial do projeto em termos de seu impacto no comportamento estatístico do processo e na ocorrência de eventos operacionais de interesse.

4.5.1 Análise baseada no comportamento estatístico

4.5.1.1 Identificação da janela de oportunidade

A expressão *janela de oportunidade* é utilizada ao longo deste documento para denotar a margem de melhoria de desempenho que um determinado processo ou operação possui. Ou seja, quanto maior a janela de oportunidade maior o espaço e possibilidade existente para se aprimorar aquele determinado processo.

Apesar de o conceito parecer subjetivo, existem alguns métodos que permitem a mensuração e quantificação desta janela a partir de dados históricos do processo.

Os itens que se seguem apresentam alguns destes métodos.

4.5.1.1.1 Método da variabilidade capaz

Shunta (1995) afirma que a variabilidade total de um determinado processo pode ser decomposta em:

- variabilidade especial – resultante da ação de fatores externos ou de causas especiais e atribuíveis;
- variabilidade natural (ou capaz) – resultante de causas de variação comuns e inerentes ao processo.

Shunta (1995) afirma ainda que, o controle regulatório e estatístico de processo, quando aplicado de forma adequada, tem a capacidade de eliminar o efeito da grande maioria das causas especiais e externas de variação. Em outras palavras, um bom sistema de controle e automação é capaz de reduzir a variabilidade do processo à sua variabilidade natural.

Baseado no trabalho de Shunta (1995) para análise da redução possível de variabilidade de um processo (ou malha), propõe-se uma extensão do método para identificação da janela de oportunidade de um negócio.

Ao se reduzir a variabilidade de um dado processo, cria-se a possibilidade de um deslocamento do ponto de operação para mais próximo dos limites de especificação ou limites de segurança, conforme ilustra a Figura 14.

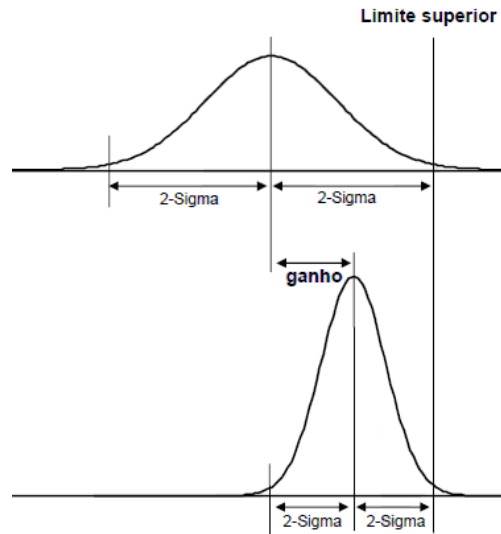


Figura 14 – Deslocamento de média em função da redução de variabilidade

Neste caso, a janela de oportunidade é representada justamente pelo deslocamento da média que se torna possível com a redução da variabilidade. Tal deslocamento pode ser quantificado utilizando o procedimento descrito nos itens A, B e C que se seguem e que foram propostos por Shunta (1995):

A) Cálculo da Variabilidade Total

A variabilidade total de um processo pode ser estimada pelo desvio padrão amostral deste processo, cuja equação é dada por:

$$S_{tot} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad \text{Equação 4-1}$$

onde

X_i é um ponto coletado da variável de processo, qualidade ou negócio usada na análise

n é o número total de pontos

\bar{X} é a média dos pontos, que é dada pela Equação 4-2

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i)}{n} \quad \text{Equação 4-2}$$

B) Cálculo da Variabilidade Natural

A variabilidade natural (ou capaz), como já mencionado, é aquela decorrente de causas comuns, aleatórias e inerentes à natureza do processo.

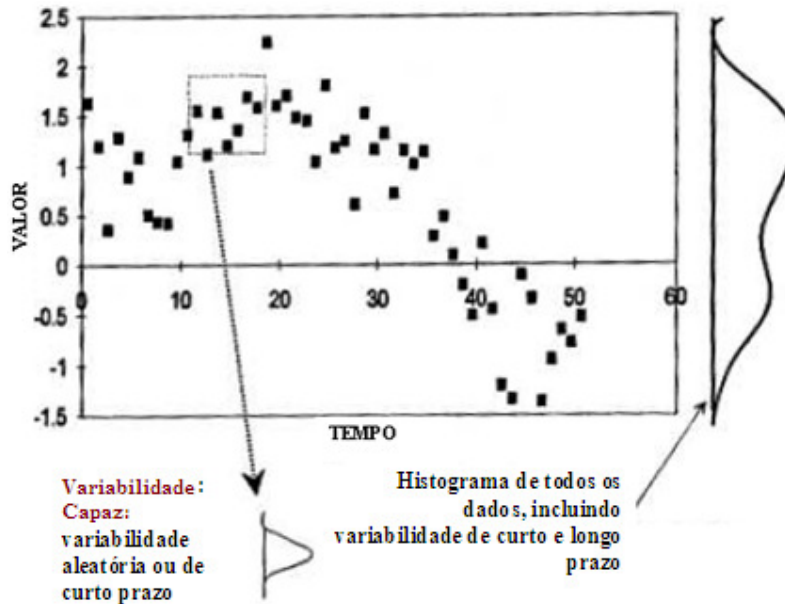


Figura 15 – Variabilidade total e capacidade (Shunta, 1995)

A Figura 15 ilustra melhor o conceito de variabilidade total e variabilidade capaz. A janela de dados total contém tanto variações de curto-prazo (causas naturais) quanto variações de longo prazo (causas especiais). O desvio padrão amostral medido pela influência combinada de ambas as variações é uma boa estimativa da variabilidade total. Já o desvio padrão amostral medido pela influência apenas das variações de curto prazo (ex. caixa em destaque) pode ser entendido como boa estimativa da variabilidade natural ou capaz.

Para se estimar a variabilidade capaz a partir dos dados, Shunta (1995) propõe três alternativas de métodos:

- **Método do “melhor operador”** – este método estabelece que, dentro do conjunto total de dados, sejam escolhidos os períodos onde a variável se mostrou mais estável com variações mais brandas e controle mais efetivo. A variabilidade capaz seria dada pela média dos desvios padrão amostrais calculados para cada período selecionado.

$$S_{cap} = \frac{\sum_{i=1}^p S_i}{p}$$

Equação 4-3

Onde S_i é o desvio padrão amostral de cada período (dado pela Equação 4-1) e p é o número de períodos selecionados para a análise.

- **Média da Faixa Móvel (*Average Moving Range*)** – a faixa móvel é o módulo da diferença entre pares de pontos sucessivos em uma série temporal. A média da faixa móvel é a média de tais diferenças e pode ser calculada pela seguinte equação:

$$MR = \sum_{i=2}^n \frac{|X_i - X_{i-1}|}{(n-1)} \quad \text{Equação 4-4}$$

A variabilidade capaz pode ser estimada dividindo-se a média da faixa móvel pela constante d_2 . Essa é a constante utilizada na construção de cartas de controle de variáveis e, para pares de dados, tem valor tabelado de 1,128 (Montgomery, 2004).

$$S_{cap} = \frac{MR}{d_2} \quad \text{Equação 4-5}$$

Deve-se observar que o efeito de se substituir a diferença entre cada ponto e a média (Equação 4-1) pela diferença entre pontos sucessivos (Equação 4-4) é o cancelamento da parcela de variabilidade trazida pelas variações de longo-prazo e de causas especiais.

- **Média Quadrática de Diferenças Sucessivas (*Mean Square Successive Difference*)** – a variabilidade capaz estimada com o MSSD é similar ao método da média da faixa móvel:

$$S_{cap} = \sqrt{\sum_{i=2}^n \frac{(X_i - X_{i-1})^2}{2 \cdot (n-1)}} \quad \text{Equação 4-6}$$

Os resultados da Equação 4-5 e Equação 4-6 são praticamente idênticos.

Três observações importantes precisam ser feitas em relação aos métodos da Faixa Móvel e Média Quadrática de Diferenças Sucessivas (Shunta, 1995): 1) estes métodos não apresentam bons resultados quando a massa de dados apresenta oscilações fortes ou *outliers*. Isso porque a distância entre dois pontos sucessivos nestes casos

costuma ser maior do que a distância de cada ponto em relação à média; 2) a variabilidade capaz estimada a partir destes métodos assume tanto um controle estatístico ideal quanto um controle regulatório ideal. Caso se deseje conhecer a variabilidade capaz decorrente apenas de um controle regulatório ideal (controlador de variância mínima), deve-se utilizar a Equação 4-7; 3) Caso exista um tempo morto elevado entre o evento no processo e a sua leitura (em laboratório ou via sistema), este tempo morto deve ser levado em consideração modificando-se a Equação 4-6 e aplicando-se a Equação 4-8.

$$S_{apc} = S_{cap} \sqrt{2 - \left[\frac{S_{cap}}{S_{tot}} \right]^2} \quad \text{Equação 4-7}$$

$$S_{cap(d)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2+d}^n (X_i - X_{i-1-d})^2}{2(n-1-d)}} \quad \text{Equação 4-8}$$

$$d = \frac{\text{tempo}_\text{morto}_\text{laboratorio}}{\text{periodo}_\text{amostragem}}$$

onde,

C) Cálculo do Deslocamento de Média

Como já foi mencionado anteriormente, a janela de oportunidade calculada pelo método da variabilidade capaz é representada pelo deslocamento da média (ou ponto operacional) na variável de negócio que é possível ser realizado em decorrência da redução de variabilidade estimada para este indicador (Figura 14).

De posse dos valores de variabilidade total e variabilidade capaz, estimados nos passos anteriores, o deslocamento possível da média é dado pela seguinte equação (Latour et al., 1986; Martin et al., 1991):

$$\Delta X = \left(1 - \frac{S_{cap}}{S_{tot}} \right) \cdot (X_L - \bar{X}_{antigo}) \quad \text{Equação 4-9}$$

Onde:

ΔX é o possível deslocamento na média (janela de oportunidade)

S_{cap} é a variabilidade capaz estimada⁵

S_{tot} é a variabilidade total estimada

\bar{X}_{antigo} é a média original

⁵ Da mesma maneira, pode ser utilizada a variabilidade capaz S_{apc} (Equação 4-7) caso a intenção futura seja somente de se aplicar controle regulatório ao processo.

X_L representa um limite de especificação

Um cuidado que se deve ter ao aplicar a Equação 4-9 é na definição do parâmetro X_L . Este parâmetro pode ser entendido como uma espécie de balizador para o deslocamento da média. Deve-se atribuir a este parâmetro algum limite de especificação ou restrição conhecida. Entretanto, na ausência de limites ou restrições documentadas (o que é comum em vários casos) pode-se aplicar o *critério da igual violação* (Latour et al., 1986; Guimarães Neto, 2006).

O *critério da igual violação* ajuda a definir um limite X_L tal que a violação deste limite seja a mesma, antes e após o deslocamento da média. Isso é o mesmo que dizer que *a área da gaussiana aproximada pelos dados que ultrapassa o limite é igual para os dois cenários*, como ilustra a Figura 16.

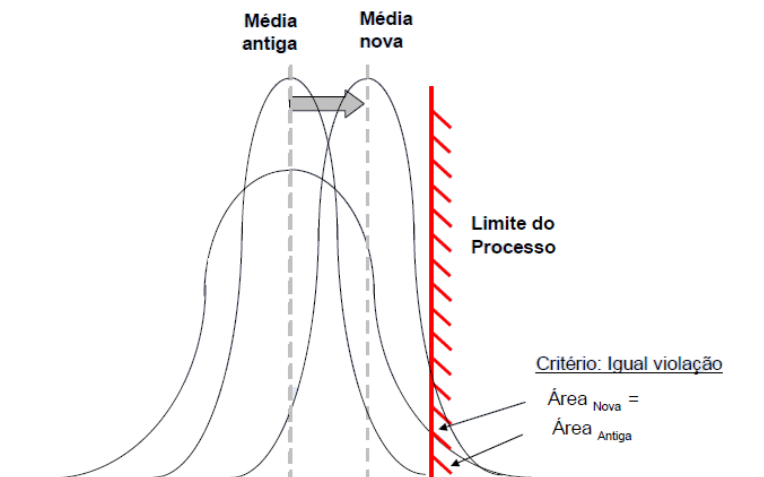


Figura 16 – Deslocamento de média pelo critério da igual violação (adaptado de Guimarães Neto, 2006)

Uma boa prática na utilização do *critério de igual violação* é a de se utilizar algum percentil no lugar do parâmetro X_L . Um percentil é uma medida da posição relativa de uma unidade observacional em relação a todas as outras. O p-ésimo percentil tem no mínimo p% dos valores abaixo daquele ponto e no mínimo (100 – p)% dos valores acima. Por exemplo, se uma altura de 1,80m é o 90°. percentil de uma turma de estudantes, 90% da turma tem alturas menores que 1,80m e 10% têm altura superior a 1,80m. Se a taxa de produção de 100.000t/dia de minério de uma unidade de beneficiamento é o 95° percentil (ou percentil95) dentro do conjunto de valores de

produção diários ao longo de um ano, 95% destes valores estão abaixo de 100.000t/dia e 5% estão acima.

Sendo assim, manter o percentil antes e depois do deslocamento de média equivale à aplicação do *critério de igual violação*.

4.5.1.1.2 Método do benchmarking interno

O *benchmarking* é um instrumento de gestão muito utilizado para melhorar o desempenho das empresas e conquistar a superioridade em relação à concorrência. Baseia-se na aprendizagem das melhores experiências (*benchmarks*) da própria empresa ou de empresas similares, e sua aplicação com foco na excelência operacional.

No contexto do cálculo da janela de oportunidade, o método prevê a comparação entre a média recente da(s) variável(is) de negócio e algum *benchmark* interno (da própria empresa) que pode ser representado, por exemplo, pela média dos melhores resultados obtidos no passado.

$$Janela_oportunidade = benchmark_interno - media_recente \quad \text{Equação 4-10}$$

A vantagem deste método é alertar para problemas sistemáticos que, justamente por acontecerem com frequência, passam a ser considerados como situação normal e não como problema. Entretanto, o maior cuidado que deve ser tomado ao se aplicar este método é o de verificar se a base de comparação é válida. Ou seja, se as condições básicas de operação, de processo e de infra-estrutura são as mesmas para ambos os períodos envolvidos na comparação. Com isso aumenta-se a possibilidade de que a janela de oportunidade seja referente exclusivamente ao desempenho do processo ou da operação.

4.5.1.1.3 Método do benchmarking externo

O processo de *benchmarking* externo (*benchmarking* de mercado) é semelhante à ao de *benchmarking* interno, com a diferença de que, no caso interno, o valor referenciado já foi conseguido naquela planta.

Em geral, o *benchmark* externo provém de estudos teóricos, artigos técnicos, padrões e normas, melhores práticas de mercado, entre outras fontes.

De forma análoga ao método anterior, aqui o cuidado a ser tomado é o de se verificar as premissas e considerações feitas ao se publicar o *benchmark*. Isso porque é

natural imaginar que o cenário externo e interno apresente diferenças relevantes para que possa ser estabelecida a comparação.

$$Janela_oportunidade = benchmark_externo - media_recente \quad \text{Equação 4-11}$$

4.5.1.1.4 Método da eliminação dos piores resultados

Este é um método frequentemente adotado pelas empresas de engenharia consultiva. A partir dele, a janela de oportunidade é estimada calculando a diferença entre a média recente da variável de interesse e a média da mesma variável após serem excluído os pontos que representam os piores resultados.

$$Janela_oportunidade = media_excluindo_piores_resultados - media_recente \quad \text{Equação 4-12}$$

O método se baseia no fato de que os piores resultados acontecem quando o processo está sendo operado de forma inconsistente (geralmente em modo manual) e que, de alguma forma, houve descuido ou falta de condições para manter a operação sob controle. De acordo com o escopo do projeto em análise e considerando que a principal função da automação é a de manter o processo sob controle durante todo o tempo, é razoável supor que os piores resultados serão eliminados.

Não há um critério exato para se decidir quais os pontos ou grupo de pontos que devem ser excluídos. Uma boa prática neste caso é a de se aproximar a curva normal dos dados e eliminar aqueles valores que estão abaixo da média subtraída de um desvio padrão, como mostra o exemplo da Figura 17. Experiências mostram que aplicando-se esta prática, alcança-se resultados semelhantes àqueles quando aplicados os métodos apresentados em 4.5.1.1.1.

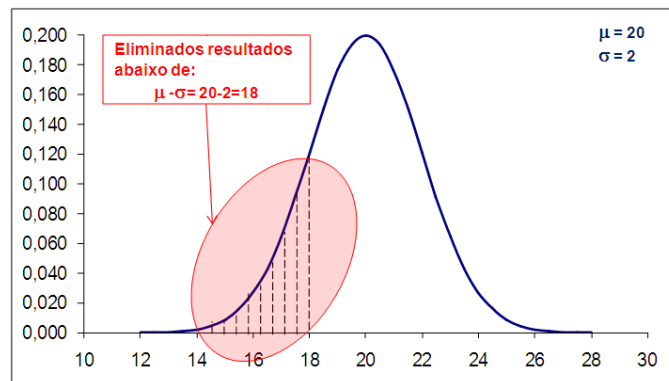


Figura 17 – Exemplo de eliminação de piores resultados

4.5.1.2 Análise de sensibilidade e cálculo do ganho potencial

A janela de oportunidade identificada por meio das técnicas apresentadas na seção 4.5.1.1 representa o potencial de melhoria de um determinado direcionador de negócio. Porém, nem sempre será possível aproveitar toda a janela de oportunidade em um único projeto. Muitas vezes, serão necessários mais de um projeto, com escopos complementares, para que todas as variáveis de processo associadas ao direcionador de negócio sejam impactadas e todo o potencial de melhoria seja capturado. Diante disso, a análise de sensibilidade é um passo importante da metodologia que visa identificar qual a parcela da janela de oportunidade pode ser aproveitada pelo projeto em análise. Nesta análise confronta-se o peso de cada variável de processo impactada pelo escopo do projeto com o potencial global de melhoria para saber quanto desse potencial é capturável com o projeto em questão.

As sub-seções que se seguem apresentam algumas propostas de métodos para se realizar a análise de sensibilidade.

4.5.1.2.1 Método da Matriz de Variabilidade Adaptado – uma proposta

O conceito de Matriz de Variabilidade foi proposto por Farenzena e Trierweiler (2006). Em seu trabalho, Farenzena e Trierweiler apresentam a Matriz de Variabilidade como uma ferramenta para se estudar e quantificar o impacto que a variabilidade de uma ou mais malhas de controle têm sobre a variabilidade de outra(s) malha(s) de controle de uma mesma planta ou processo.

Em uma análise que antecede a construção da matriz, Farenzena e Trierweiler definem, dentro do seu universo de malhas de controle, quais são as *primárias* – aquelas principais, que têm impacto direto no produto final ou nos indicadores de negócio – e quais são as *secundárias* – aquelas auxiliares, que não estão diretamente acopladas com o produto final ou algum indicador de negócio mas que podem influenciar indiretamente no desempenho do processo. O intuito dessa classificação é o de direcionar a análise no sentido de se identificar o impacto econômico no negócio associado ao potencial de redução de variabilidade apresentado pelas malhas primárias.

A construção da Matriz de Variabilidade é feita identificando-se como um aumento ou uma redução de variabilidade na malha secundária j afeta a variabilidade da malha principal i . Ou seja, cada elemento (i,j) da matriz é dado por:

$$MV(i, j) = \frac{\Delta \text{variabilidade}(vc_i)}{\Delta \text{variabilidade}(vc_j)} \quad \text{Equação 4-13}$$

Onde vc_i é a variável controlada pela malha i e vc_j é a variável controlada pela malha j .

A representação esquemática proposta por Farenzena para a matriz é a mostrada na Figura 18.

		All Loops				
		Primary Loops			Sec Loops	
		Pr ₁	Pr ₂	Pr ₃	Sc ₁	Sc ₂
P r i m a r y	Pr ₁	1	X	X	X	X
	Pr ₂	X	1	X	X	X
	Pr ₃	X	X	1	X	X

Figura 18 – Representação esquemática da matriz de variabilidade (Farenzena e Trierweiler, 2006)

Interessante observar a semelhança entre o conceito de Matriz de Variabilidade e o conceito de RGA (*Relative Gain Array* ou Matriz de Ganhos Relativos) (Seborg, 1989; Torres, 2002). Em ambos os casos busca-se entender a relação e grau de acoplamento que existe entre duas malhas de controle. Entretanto, enquanto na matriz de variabilidade este acoplamento é analisado sob o ponto de vista do impacto em variabilidade, na matriz RGA o foco está voltado para o ganho relativo que existe entre duas malhas. Ou seja, nesta última, buscar-se-á encontrar a variação que ocorre na variável de controle da malha i quando a variável de controle da malha j sofre uma variação em magnitude enquanto as médias das demais variáveis de controle permanecem constantes.

Para aplicação na metodologia proposta pelo presente trabalho, extrapolar-se-á o conceito de Matriz de Variabilidade para que encampe não só a inter-relação entre malhas de controle mas também a relação que existe entre as variáveis de negócio e as variáveis de processo envolvidas na análise. Dessa forma, a sensibilidade da(s) variável(is) de negócio às variáveis de processo é representada pelo impacto da mudança de variabilidade das segundas na variabilidade da(s) primeira(s). Ou seja, nesta adaptação do conceito de Matriz de Variabilidade tem-se:

$$IS_{i,j} = \frac{\Delta \text{variabilidade}(vn_i)}{\Delta \text{variabilidade}(vp_j)} \quad \text{Equação 4-14}$$

Onde IS é o índice de sensibilidade, vn_i é a variável de negócio i e vp_j é a variável de processo j .

Para que a construção da matriz seja feita da forma correta deve-se ter em mente as seguintes observações:

- A variabilidade das variáveis de negócio e de processo podem ser estimadas pelo desvio padrão amostral de seus registros históricos (Equação 4-1);
- Para se encontrar a sensibilidade entre vn_i e vp_j deve-se procurar na base de dados históricos momentos em que houve grande alteração na variabilidade de vp_j coincidindo com pouca ou nenhuma mudança de variabilidade nas demais variáveis de processo;
- Caso o histórico não possua momentos como descrito no item anterior, uma opção é forçar uma perturbação na variabilidade de vp_j , o que pode ser feito por meio da alteração de parâmetros de controle ou da adição de perturbações externas conhecidas;
- O valor a ser alocado na matriz deve, preferencialmente, ser uma média entre diversas medidas de sensibilidade realizadas para pontos de operação distintos;

Construída a matriz, ou seja, encontradas as sensibilidades de cada variável em relação às variáveis de processo envolvidas, o próximo passo é identificar os pesos relativos que cada variável de processo tem sobre cada variável de negócio. Quanto maior a sensibilidade da variável de negócio em relação a uma determinada variável de processo, maior o peso daquela variável de processo comparado com as demais variáveis. O cálculo deste peso pode ser feito como mostram a Equação 4-15 e a Equação 4-16.

$$SP_{i,j} = \frac{|IS_{i,j}|}{|IS_{i,1}| + |IS_{i,2}| + |IS_{i,3}| + \dots + |IS_{i,n_{vp}}|} \quad \text{Equação 4-15}$$

$$SP_{i,j} = \frac{\sqrt{IS_{i,j}^2}}{\sum_{n=1}^{n_{vp}} \sqrt{IS_{i,n}^2}} \quad \text{Equação 4-16}$$

Onde $SP_{i,j}$ (sensibilidade ponderada) é o peso em valores percentuais da variável de processo vp_j sobre a variável de negócio vn_i , e n_{vp} é o número de variáveis de processo envolvidas na análise.

Calculo do ganho potencial

O cálculo do ganho potencial pode ser feito combinando-se três elementos já identificados nos passos anteriores. São eles:

- Escopo do projeto (4.1)
- Janela de Oportunidade (4.5.1.1)
- Sensibilidade ponderada da variável de negócio (4.5.1.2.1)

O papel do escopo do projeto neste ponto, como já foi mencionado em 4.3, é o de entender quais das variáveis de processo serão impactadas pelo projeto e sofrerão ações de redução de variabilidade. De posse dessa informação, soma-se a sensibilidade ponderada da variável de negócio em relação a tais variáveis de processo e multiplica-se o resultado dessa soma pela janela de oportunidade calculada. O resultado é o ganho potencial estimado do projeto. A Equação 4-17 resume este racional:

$$\text{Ganho}_{\text{Potencial}}_{\text{Estimado}} = \sum_j \left[\left(\sum_k SP_{kj} \right) \cdot \text{janela}_{\text{oportunidade}_j} \right] \quad \text{Equação 4-17}$$

Onde k representa cada variável de processo incluída no escopo do projeto e j representa cada variável de negócio impactada pelo projeto.

É fácil perceber que, no caso em que todas as variáveis de processo com influência sobre o direcionador de negócio são impactadas pelo escopo do projeto, o ganho potencial estimado é igual à janela de oportunidade.

A aplicação deste método é mais indicada para casos onde o número de variáveis envolvidas é pequeno. Isso porque, em um ambiente multivariável, não é tarefa fácil encontrar ou reproduzir períodos em que uma variável se mova enquanto todas as outras se mantêm constantes. Para casos onde o número de variáveis envolvidas é elevado, os dois métodos que serão apresentados nas sub-seções 4.5.1.2.2 e 4.5.1.2.3 se mostram mais adequados.

Exemplo 4-1

O presente exemplo serve para ilustrar a análise de sensibilidade realizada pelo método da matriz de variabilidade.

Para o exemplo supõe-se que, dado um determinado processo, foram identificadas uma única variável de negócio e três variáveis de processo que causam impacto na primeira.

A Figura 19 apresenta os gráficos de variabilidade (desvio padrão amostral) versus tempo para cada uma das quatro variáveis. Cada ponto no gráfico representa o desvio padrão amostral médio calculado com as amostras contidas em uma unidade de tempo (podendo ser hora, dia, semana, etc...).

De posse desses dados pode-se iniciar a construção da matriz de variabilidade. Para tal, basta calcular o índice de sensibilidade IS para os emparelhamentos possíveis entre variável de negócio e variáveis de processo. Neste exemplo, são três os emparelhamentos possíveis: IS_{11} ; IS_{12} e IS_{13} .

O cálculo do Índice de Sensibilidade é dado pela Equação 4-16. Além disso, conforme já explicado, o numerador e denominador da equação devem considerar variações de desvio padrão amostral ocorridas em um período no qual esta mesma variação é mínima ou nula para as demais variáveis não envolvidas na equação.

No caso do emparelhamento entre a variável de negócio e a variável de processo #1 isto ocorre, por exemplo, entre as unidades de tempo 42 e 44, conforme destacado pelos círculos “C” na Figura 19. Com isso, tem-se:

$$IS_{1,1} = \frac{\Delta \text{variabilidade}(vn_1)}{\Delta \text{variabilidade}(vp_1)} = \frac{\sigma_{vn1}(44) - \sigma_{vn1}(42)}{\sigma_{vp1}(44) - \sigma_{vp1}(42)} = -0,17 \quad \text{Equação 4-18}$$

O mesmo se aplica para o cálculo de IS_{12} e IS_{13} , sendo que os momentos escolhidos para obtenção da sensibilidade nestes casos estão representados respectivamente pelos círculos “A” e “B” na Figura 19⁶.

⁶ Na prática, recomenda-se utilizar uma janela de tempo mais longa que permita a extração de mais de uma medida para cada índice. Desta forma, o valor do índice pode ser calculado como uma média das várias medidas realizadas, ficando mais próximo da sensibilidade real.

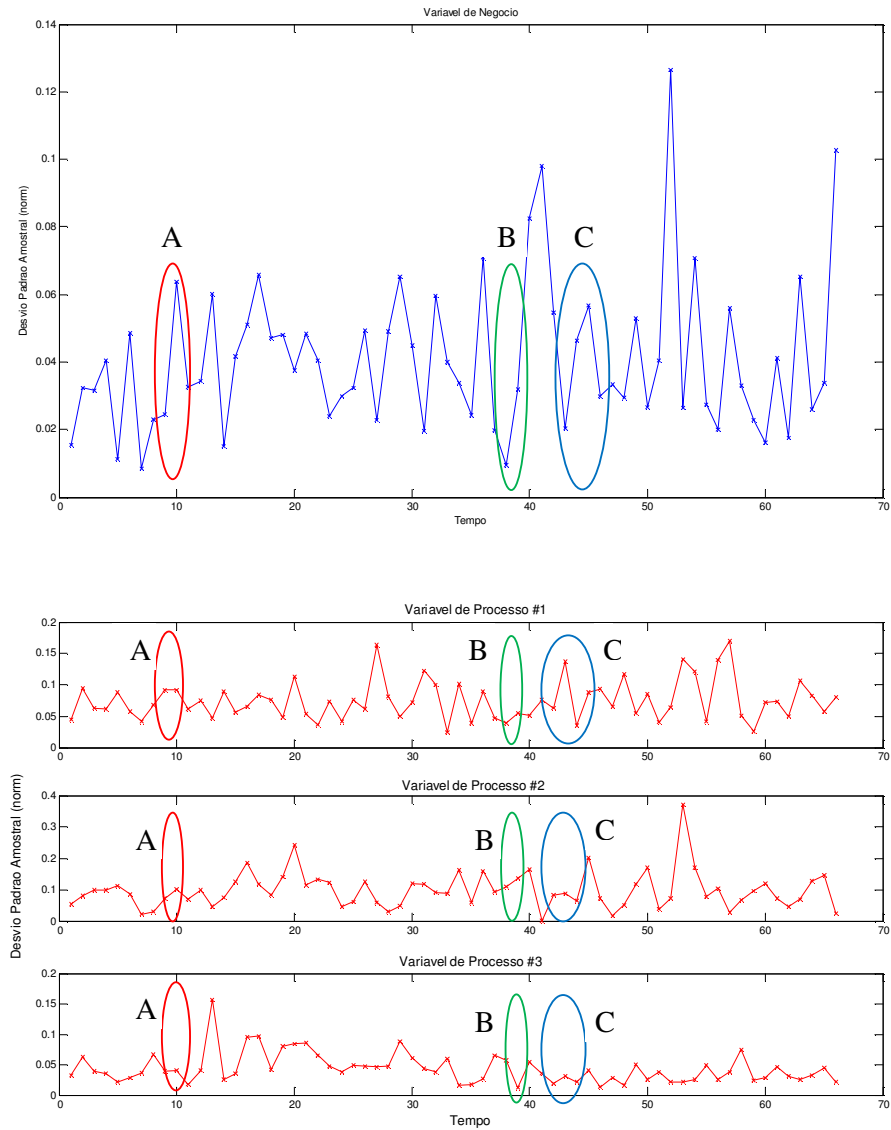


Figura 19 – Gráficos de tendência de variabilidade do processo

$$IS_{1,2} = \frac{\Delta \text{variabilidade}(vn_1)}{\Delta \text{variabilidade}(vp_1)} = \frac{\sigma_{vn1}(10) - \sigma_{vn1}(9)}{\sigma_{vp2}(10) - \sigma_{vp2}(9)} = 1,18$$

Equação 4-19

$$IS_{1,3} = \frac{\Delta \text{variabilidade}(vn_1)}{\Delta \text{variabilidade}(vp_1)} = \frac{\sigma_{vn1}(39) - \sigma_{vn1}(38)}{\sigma_{vp3}(39) - \sigma_{vp3}(38)} = 0,34$$

Equação 4-20

O próximo passo consiste em aplicar a Equação 4-16 para encontrar os pesos relativos de cada variável de processo na variável de negócio. Sendo assim:

$$SP_{1,1} = \frac{\sqrt{IS_{1,1}^2}}{\sum_{n=1}^3 \sqrt{IS_{1,n}^2}} = \frac{\sqrt{(-0,17)^2}}{\sqrt{(-0,17)^2} + \sqrt{(1,18)^2} + \sqrt{(0,34)^2}} = 10\% \quad \text{Equação 4-21}$$

$$SP_{1,2} = \frac{\sqrt{IS_{1,2}^2}}{\sum_{n=1}^3 \sqrt{IS_{1,n}^2}} = \frac{\sqrt{(1,18)^2}}{\sqrt{(-0,17)^2} + \sqrt{(1,18)^2} + \sqrt{(0,34)^2}} = 70\% \quad \text{Equação 4-22}$$

$$SP_{1,3} = \frac{\sqrt{IS_{1,3}^2}}{\sum_{n=1}^3 \sqrt{IS_{1,n}^2}} = \frac{\sqrt{(0,34)^2}}{\sqrt{(-0,17)^2} + \sqrt{(1,18)^2} + \sqrt{(0,34)^2}} = 20\% \quad \text{Equação 4-23}$$

De posse desses valores, basta verificar qual(is) das três variáveis de processo é contemplada no escopo do projeto e aplicar a Equação 4-17 sobre tais variáveis no sentido de obter a parcela da janela de oportunidade que é capturável pelo projeto em questão.

Supondo, por exemplo, que apenas a variável de processo 3 é contemplada no escopo do projeto, isso significaria dizer que apenas 20% da janela de oportunidade poderia ser capturada pelas melhorias deste projeto.

4.5.1.2.2 Método da Correlação Cruzada

Em Estatística, as medidas mais comumente empregadas para se explicar o grau de relação entre o comportamento de duas séries temporais distintas são a correlação e a covariância.

Para duas séries de dados, X (X1, X2,..) e Y(Y1,Y2...), a covariância fornece uma medida não padronizada do grau no qual elas se movem juntas, e é estimada tomando o produto dos desvios da média para cada variável em cada período conforme Equação 4-24 (Bertolo, 2009).

$$Cov(X, Y) = \sigma_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad \text{Equação 4-24}$$

O sinal na covariância indica o tipo de relação que as duas variáveis têm. Um sinal positivo indica uma relação direta e um negativo indica uma relação inversa.

A covariância cresce com o grau de relacionamento, entretanto é relativamente difícil fazer julgamentos a partir desta medida uma vez que ela não é padronizada (Bertolo, 2009).

O coeficiente de correlação ρ é a medida padronizada da relação entre duas variáveis. Ele pode ser calculado a partir da covariância como mostra a Equação 4-25.

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Equação 4-25}$$

onde $-1 \leq \rho_{xy} \leq 1$.

Uma correlação próxima a zero indica que as duas variáveis não estão relacionadas. Uma correlação positiva indica que as duas variáveis possuem relação direta e a relação é tanto mais forte quanto mais o coeficiente se aproxima de 1. Uma correlação negativa indica que as duas variáveis movem-se em direções opostas, e que a relação também fica mais forte quanto mais próxima de -1.

Tomando-se como base os conceitos apresentados nos parágrafos anteriores, a proposta consiste na utilização do fator de correlação entre cada variável de processo e a(s) respectiva(s) variável(is) de negócio como uma medida da sensibilidade desta(s) última(s) em relação às primeiras. Em outras palavras, a parcela da janela de oportunidade que pode ser preenchida pelo projeto em análise se torna uma função do fator de correlação existente entre as variáveis de processo afetadas pelo escopo do projeto e a(s) variável(is) de negócio pela(s) qual(is) a janela de oportunidade fora calculada.

Assim como foi proposto no Método da Matriz de Variabilidade (4.5.1.2.1), a Equação 4-26 apresenta o cálculo da Sensibilidade Ponderada a partir dos fatores de correlação (ρ) encontrados entre as variáveis.

$$SP_{i,j} = \frac{\sqrt{\rho_{i,j}^2}}{\sum_{n=1}^{n_{vp}} \sqrt{\rho_{i,n}^2}} \quad \text{Equação 4-26}$$

Com isso, o cálculo do Ganho Potencial Estimado para o projeto pode ser realizado de forma semelhante utilizando a Equação 4-17.

Em muitos casos haverá um atraso (*lag*) entre variações nas variáveis de processo e seus efeitos na(s) variável(is) de negócio. Quando isso for o caso, deve-se realizar o cálculo do coeficiente de correlação cruzada levando-se em consideração tal atraso. Se o valor do atraso for desconhecido, a melhor opção é a utilização da Função de Correlação Cruzada (FCC) (Aguirre, 2000), que calcula os coeficientes de correlação para diversos valores de atraso permitindo identificar em qual deles a correlação é máxima.

Exemplo 4-2

A Figura 20 mostra um gráfico de tendência representando o comportamento no tempo de uma determinada variável de negócio. A Figura 21 apresenta um conjunto de gráficos de tendência para cinco variáveis de processo que têm influência na variável de negócio supracitada.

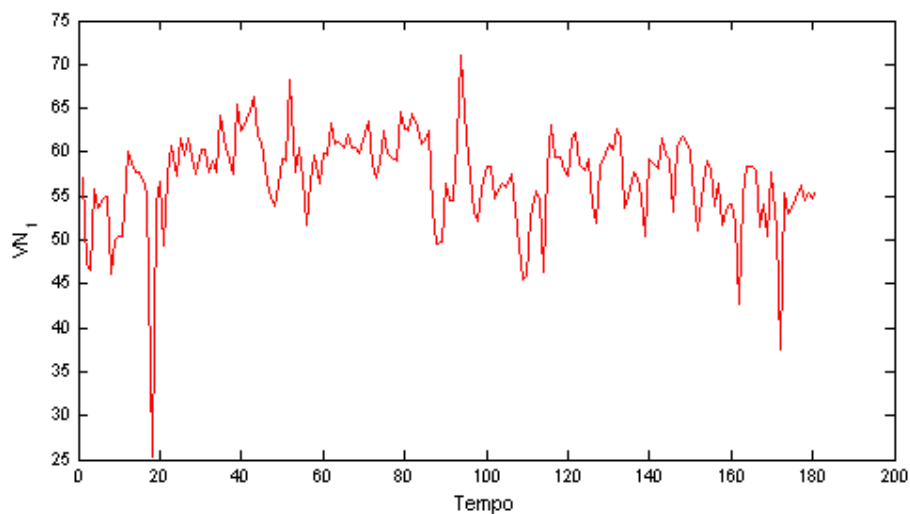


Figura 20 – Gráfico de tendência da variável de negócio

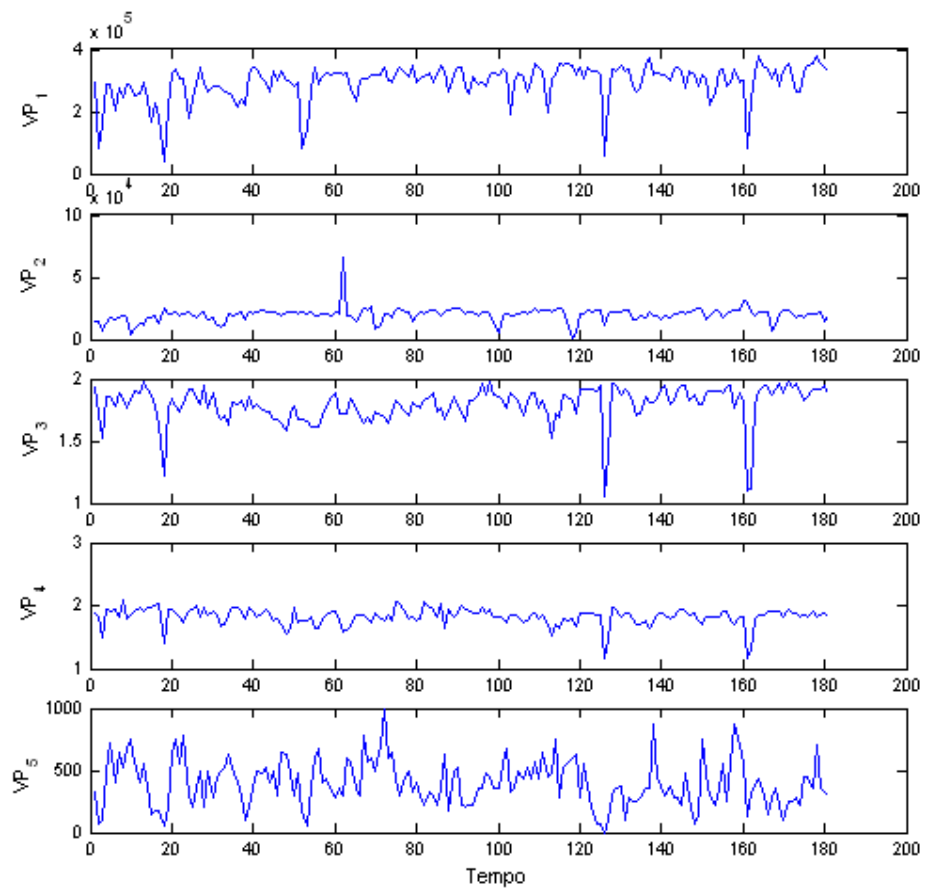


Figura 21 – Gráfico de tendência das variáveis de processo

A Tabela 3 apresenta os 50 primeiros valores das séries históricas registradas nos gráficos da Figura 20 e Figura 21.

Tabela 3 – Valores históricos das variáveis de negócio e de processo

VII_1	VP_1	VP_2	VP_3	VP_4	VP_5
57,1	294420	14807	1,93	1,88	325
47,2	79800	13688	1,72	1,82	75
46,6	158580	6705	1,53	1,5	100
55,8	288780	12576	1,86	1,94	475
53,7	285700	17879	1,85	1,92	725
54,7	203910	15638	1,78	1,94	400
54,9	276960	18162	1,89	1,83	650
46,1	248270	19601	1,84	2,09	525
50	288750	17769	1,76	1,78	675
50,5	283670	3759	1,83	1,86	750
50,4	253680	8790	1,9	1,92	575
60	255600	12284	1,89	1,98	400
58,8	293630	10884	1,98	1,92	550
57,8	241220	18113	1,92	1,96	375
57,8	164320	17014	1,87	1,96	150
56,9	228460	19637	1,78	1,99	175
55,3	185440	12634	1,63	2,03	175
25,3	41140	24347	1,22	1,39	50
54	216970	19966	1,76	1,95	200
56,7	321410	20985	1,84	1,94	625
49,3	336500	22550	1,78	1,89	750
57,2	308280	19691	1,73	1,82	550
60,7	303660	20628	1,8	1,74	775
57,4	180130	21862	1,91	1,91	300
61,5	237950	18729	1,92	1,93	200
59,6	287150	17343	1,86	2,01	350
61,5	344860	20421	1,79	1,82	500
59,5	294650	21561	1,95	1,96	200
57,6	265380	15605	1,76	1,84	500
60,3	284140	17121	1,88	1,92	275
60,3	284140	11430	1,73	1,85	450
57,7	278000	9775	1,67	1,67	500
59,1	263010	10624	1,7	1,69	525
57,8	255870	20655	1,63	1,85	625
64,1	252410	18395	1,81	1,97	525
60,5	212440	20059	1,79	1,96	400
59,2	238140	21769	1,82	1,91	300
57,6	222450	16524	1,75	1,8	100
65,5	322410	22156	1,86	1,98	200
62,4	341220	21012	1,77	1,91	350
63	338030	21777	1,8	1,81	500
64,7	305940	22923	1,75	1,89	475
66,4	292920	22598	1,73	1,94	525
61,7	263850	22315	1,74	1,87	400
61,1	332960	21379	1,67	1,77	500
58,1	299940	20306	1,68	1,8	300
55,5	328140	19161	1,65	1,71	650
53,9	297380	21268	1,58	1,54	625
56,2	294500	22085	1,72	1,65	475

De posse de tais valores históricos e aplicando-se a Equação 4-25 para cada par Variável_Negócio x Variável_Processo, obtém-se os coeficientes de correlação mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de Correlação

	VN_1
VP_1	$\rho_{11} = 0,28$
VP_2	$\rho_{21} = 0,07$
VP_3	$\rho_{31} = 0,24$
VP_4	$\rho_{41} = 0,29$
VP_5	$\rho_{51} = -0,02$

A partir dos coeficientes de correlação, aplica-se a Equação 4-26 para calcular a Sensibilidade Ponderada da variável de negócio em relação a cada variável de processo. Os resultados são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Índices de Sensibilidade Ponderada

	VN_1
VP_1	$SP_{11} = 31\%$
VP_2	$SP_{21} = 8\%$
VP_3	$SP_{31} = 26\%$
VP_4	$SP_{41} = 32\%$
VP_5	$SP_{51} = 3\%$

Mais uma vez, de posse dos valores da Tabela 5, o próximo passo seria o de fazer referência ao escopo do projeto identificando qual(is) das cinco variáveis de processo será contemplada. Em seguida, aplicar a Equação 4-17 sobre tal(is) variável(is) para encontrar a parcela capturável da janela de oportunidade, ou seja, o ganho potencial do projeto em questão.

4.5.1.2.3 Método baseado em PLS – uma proposta

O terceiro método proposto para a realização da análise de sensibilidade e cálculo do ganho potencial baseia-se na técnica PLS (*Partial Least Squares* ou Mínimos Quadrados Parciais).

PLS é uma técnica de análise multivariada de dados que combina características da Regressão Múltipla e da Análise de Componentes Principais (PCA), tendo como principal objetivo prever ou analisar um conjunto de variáveis dependentes Y a partir

do comportamento de variáveis independentes ou preditores X (Abdi, 2007) de modo que:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \quad \text{Equação 4-27}$$

Nesta equação b_0 é o coeficiente de regressão para o intercepto e b_i são os valores dos coeficientes de regressão (para as variáveis independentes de 1 a p) calculado a partir dos dados.

De forma semelhante à PCA, a análise ou predição promovida pelo PLS se baseia na extração, a partir das variáveis independentes, de fatores ortogonais entre si que apontem nas direções de maior variação das variáveis dependentes. Tais fatores são denominados *variáveis latentes* e são equivalentes às *componentes principais* do método PCA (vide Figura 22).

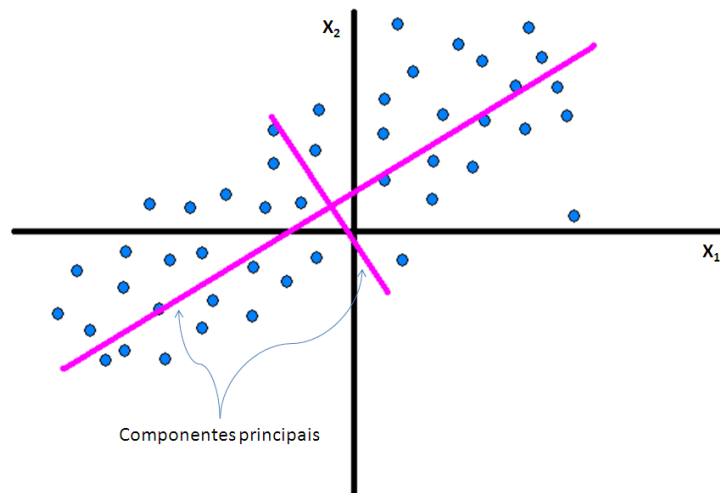


Figura 22 – Exemplo de extração das componentes principais de um conjunto de amostras

A técnica PLS difere da técnica PCA exatamente por levar em consideração informações das variáveis dependentes no cálculo das variáveis latentes. Segundo Abdi (2007), ela é particularmente útil quando se deseja analisar ou prever um conjunto de variáveis dependentes a partir de um conjunto (muito) grande de variáveis independentes.

Propõe-se o estabelecimento de paralelos entre os conceitos de variáveis de negócio e processo apresentados ao longo deste documento e os conceitos de variáveis dependentes e independentes aqui mencionados. O parágrafo anterior quando transportado para o contexto deste trabalho significa dizer que a utilização do PLS para análise de sensibilidade e cálculo do ganho potencial é, particularmente, interessante quando o número de variáveis de processo que causam impacto na(s) variável(is) de

negócio é elevado (não só absolutamente mas, também, relativamente à quantidade de observações). Além disso, segundo Tobias (1999), o PLS é útil, também, quando as variáveis independentes apresentam um certo grau de redundância entre si e quando é difícil se definir de forma clara e direta a relação entre estas variáveis e as variáveis dependentes. Este é exatamente o caso em análise neste trabalho em que as variáveis de processo correspondem às variáveis independentes e as variáveis de negócio às variáveis dependentes.

A partir deste paralelismo de conceito da técnica de PLS com o problema de estimação de retorno de investimento, propõe-se o uso dos coeficientes de regressão do modelo PLS para o cálculo da sensibilidade ponderada.

Algoritmo PLS

Para se aplicar o PLS como ferramenta para a análise de sensibilidade e cálculo do ganho potencial do projeto pode-se utilizar o algoritmo proposto por Abdi (2007). Detalhes deste algoritmo são reproduzidos nos parágrafos que se seguem.

Pré-requisitos e notações: As i observações descritas por k variáveis dependentes (negócio) são armazenadas em uma matriz $i \times k$ denominada matriz \mathbf{Y} . As i observações descritas por j variáveis independentes (processo) são armazenadas em uma matriz $i \times j$ denominada matriz \mathbf{X} .

A técnica PLS decompõe ambas as matrizes \mathbf{X} e \mathbf{Y} como um produto de um único conjunto de fatores ortogonais e um conjunto de pesos (*loadings*) específicos. Assim, as variáveis independentes são decompostas como $\mathbf{X} = \mathbf{TP}^T$ com $\mathbf{TT}^T = \mathbf{I}$, onde \mathbf{I} é a matriz identidade. Analogamente ao PCA, a matriz \mathbf{T} é denominada matriz de resultados (*scores*), e \mathbf{P} é a matriz de pesos (*loadings*). De forma semelhante, \mathbf{Y} é estimado como $\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{TC}^T$ onde \mathbf{B} é uma matriz diagonal contendo os pesos da regressão em sua diagonal e \mathbf{C} é a matriz de pesos das variáveis dependentes. As colunas de \mathbf{T} são os *vetores latentes*.

Os *vetores latentes* poderiam ser selecionados de diferentes maneiras. De fato, na formulação anterior, qualquer conjunto de vetores ortogonais cobrindo o espaço de colunas de \mathbf{X} poderia ser usado para fazer o papel de \mathbf{T} . Para especificar \mathbf{T} , condições adicionais são requeridas. No caso do PLS isso significa encontrar dois conjuntos de pesos \mathbf{w} e \mathbf{c} de forma a criar, respectivamente, uma combinação linear das colunas de \mathbf{X} e \mathbf{Y} tal que sua covariância seja máxima. Especificamente, o objetivo é de se obter um

primeiro par de vetores $\mathbf{t} = \mathbf{X}\mathbf{w}$ e $\mathbf{u} = \mathbf{Y}\mathbf{c}$, com as restrições de $\mathbf{w}^T\mathbf{w} = 1$ e $\mathbf{t}^T\mathbf{u}$ ser máximo. Quando o primeiro *vetor latente* é encontrado, ele é subtraído tanto de \mathbf{X} quanto de \mathbf{Y} e o procedimento é repetido até que \mathbf{X} se torne uma matriz nula.

Nos parágrafos abaixo é apresentado o passo-a-passo do algoritmo.

Como primeiro passo criam-se duas matrizes: $\mathbf{E} = \mathbf{X}$ e $\mathbf{F} = \mathbf{Y}$. Tais matrizes são em seguida normalizadas (i. e. transformadas em Z-scores). As somas dos quadrados das matrizes se denotam \mathbf{SSX} e \mathbf{SSY} . Antes de iniciar o processo iterativo, o vetor \mathbf{u} é inicializado com valores aleatórios. (no que se segue, o símbolo \propto implica em “normalizar o resultado da operação”)

- Passo 1. $\mathbf{w} \propto \mathbf{E}^T\mathbf{u}$ (estima os pesos de X)
- Passo 2. $\mathbf{t} \propto \mathbf{E}\mathbf{w}$ (estima os scores de X)
- Passo 3. $\mathbf{c} \propto \mathbf{F}^T\mathbf{t}$ (estima os pesos de Y)
- Passo 4. $\mathbf{u} = \mathbf{F}\mathbf{c}$ (estima os scores de Y)

Caso \mathbf{t} não tenha convergido, deve-se voltar para o Passo 1. Caso contrário, calcula-se o valor de b usado para prever \mathbf{Y} por \mathbf{t} , sendo $b = \mathbf{t}^T\mathbf{u}$, e calculam-se os *loadings* de \mathbf{X} como sendo $\mathbf{p} = \mathbf{E}^T\mathbf{t}$. Feito isso, subtrai-se (remoção parcial) o efeito de \mathbf{t} tanto de \mathbf{E} quanto de \mathbf{F} da seguinte maneira: $\mathbf{E} = \mathbf{E} - \mathbf{t}\mathbf{p}^T$ e $\mathbf{F} = \mathbf{F} - b\mathbf{t}\mathbf{c}^T$. Os vetores \mathbf{t} , \mathbf{u} , \mathbf{w} , \mathbf{c} e \mathbf{p} são armazenados nas suas matrizes correspondentes e o escalar b é armazenado como um elemento da diagonal de \mathbf{B} . A soma dos quadrados de \mathbf{X} (respectivamente \mathbf{Y}) explicados pelo *vetor latente* é calculada como $\mathbf{p}^T\mathbf{p}$ (respectivamente \mathbf{b}^2), e a proporção da variância explicada é obtida dividindo-se a soma de quadrados explicada pela soma de quadrados total correspondente (i.e, \mathbf{SSX} e \mathbf{SSY}).

Quando \mathbf{E} se torna uma matriz nula, todo o conjunto de *vetores latentes* foi encontrado. Até que isso ocorra, o procedimento deve ser repetido quantas vezes for necessário partindo do Passo 1.

A relação entre as variáveis dependentes e as variáveis independentes é dada pela fórmula de regressão $\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{T}\mathbf{B}\mathbf{C}^T = \mathbf{X}\mathbf{B}_{PLS}$ sendo $\mathbf{B}_{PLS} = (\mathbf{P}^{T+})\mathbf{B}\mathbf{C}^T$, (onde \mathbf{P}^{T+} é a pseudo-inversa *Moore-Penrose* de \mathbf{P}^T).

Enfim, a proposta consiste na utilização dos coeficientes de regressão \mathbf{B}_{PLS} como uma medida da sensibilidade da(s) variável(is) dependente(s) em relação às variáveis independentes.

Assim como foi proposto nos demais métodos, a Equação 4-28 apresenta o cálculo da Sensibilidade Ponderada a partir dos coeficientes de regressão encontrados.

$$SP_{i,j} = \frac{\sqrt{B_{PLS(i,j)}^2}}{\sum_{n=1}^{n_{vp}} \sqrt{B_{PLS(i,n)}^2}} \quad \text{Equação 4-28}$$

onde i e j variam, respectivamente, tantas forem as variáveis dependentes (negócio) e independentes (processo); e n_{vp} é o número de variáveis de processo.

Mais uma vez, o cálculo do Ganho Potencial Estimado para o projeto pode ser realizado utilizando a Equação 4-17.

Exemplo 4-3

Para ilustrar a aplicação da técnica de PLS como alternativa para a análise de sensibilidade, é apresentado um caso prático aplicado a um processo siderúrgico, mais especificamente um reator de alta-temperatura para produção de metais ferrosos.

O principal equipamento do processo é um forno cujo preenchimento consiste em duas camadas: uma camada de escória (zona de reação) onde ocorrem as reações de oxi-redução para formação dos metais ferrosos que, por sua vez, se depositam no fundo do forno formando a camada metálica. A Figura 23 apresenta o diagrama do forno.

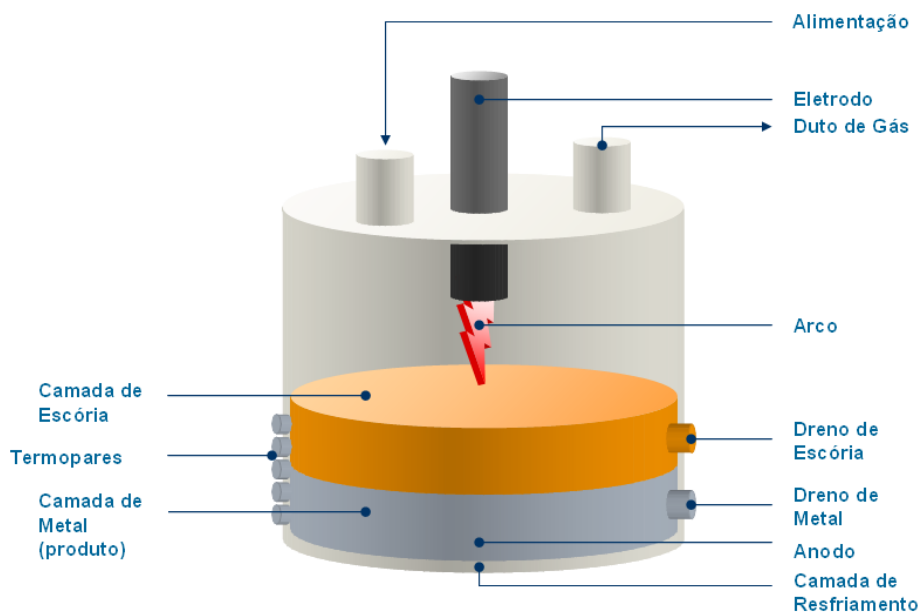


Figura 23 – Esquemático do forno

A alimentação do forno – redutores, óxidos metálicos e outros – é feita de forma contínua por meio de um eletrodo vazado. O calor necessário para o processo endotérmico de oxidação-redução é gerado pela resistência (representada pela escória) à diferença de potencial entre o cátodo (eletrodo de carbono) e o ânodo representado pela deposição metálica. O produto principal (metal) e os produtos secundários (escória e gás) são extraídos do forno através de um dreno (intermitente) e de um duto de gás (contínuo).

Em fornos como este, é comum a ocorrência de *runaway temperatures* – temperaturas anódicas ficam incontrolavelmente elevadas. Isso traz sérias consequências para a produção além de impactar na vida útil do forno.

A Tabela 6 lista as principais variáveis envolvidas no processo, sendo que a variável de maior interesse é a temperatura anódica, que está intimamente ligada às demais variáveis e cujo gráfico de tendência é mostrado na Figura 24.

Temperaturas anódicas acima de 270 °C são consideradas elevadas e por isso devem ser evitadas para que não ocorra o efeito de *runaway*.

A proposta é de se definir a temperatura anódica como variável dependente (negócio), as demais variáveis como independentes (processo) e aplicar o algoritmo PLS sobre essa massa de dados com o intuito de descobrir a sensibilidade ponderada da temperatura em relação às demais variáveis. Com isso, se for possível associar uma janela de oportunidade à redução na ocorrência de temperaturas elevadas, a análise de sensibilidade indicará qual parcela dessa janela é capturável ao se aperfeiçoar o controle das variáveis independentes.

Tabela 6 – Lista de variáveis envolvidas no processo

Classificação	Variável	Descrição
Entradas/Perturbações/Estados	CrO/Cr2O3	Composição da mistura de alimentação
	CaO flux	Vazão de alimentação do óxido de cálcio
	Ore feed	Vazão de alimentação de minério
	Reductant	Vazão de alimentação do redutor
	CO	Concentração de monóxido de carbono
	H2	Concentração de hidrogênio
	CO2	Concentração de dióxido de carbono
	Bottom freeze layer	Espessura da camada de resfriamento
	metal depth	Profundidade da camada de metal
	temp level	Temperatura do forno
	Feed power product	Produto da entrada de potência e alimentação do forno (calculado)
slag_depth	Profundidade da camada de escória	
Objetivo de controle	Temp_anode	Temperatura anódica

Resultados

Aplicando-se o algoritmo PLS apresentado em 4.5.1.2.3 envolvendo as 12 variáveis independentes mais a temperatura anódica, obteve-se os resultados mostrados na Tabela 7.

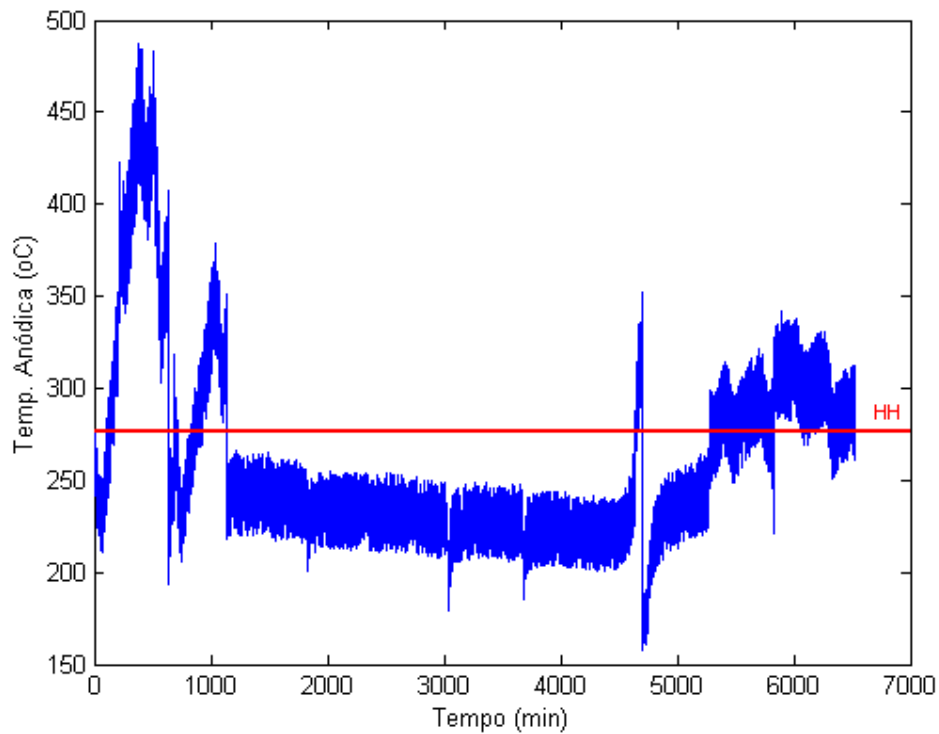


Figura 24 – Gráfico de tendência da temperatura anódica

Tabela 7 – Coeficientes de Regressão e Índices de Sensibilidade Ponderada

Variável	B _{PLS}	SP
CrO/Cr2O3	0.125	7 %
CaO flux	0.053	3 %
Ore feed	0.386	23 %
Reductant	0.041	2 %
CO	-0.035	2 %
H2	-0.032	2 %
CO2	0.060	4 %
Bottom freeze layer	-0.009	1 %
metal depth	-0.129	8 %
temp level	-0.175	10 %
Feed power product	-0.204	12 %
slag_depth	-0.439	26 %

A tabela mostra que a maior sensibilidade da temperatura anódica ocorre respectivamente em relação à profundidade da camada de escória (26%) e à alimentação

de minério (23%). Dessa forma, um projeto cujo escopo contemplasse o aperfeiçoamento do controle dessas duas variáveis teria um potencial de capturar aproximadamente 50% da janela de oportunidade associada à operação da temperatura anódica nos patamares desejados.

4.5.1.2.4 Método baseado na opinião dos especialistas

O método apresentado a seguir é semelhante ao que foi proposto por Embiruçu (2004). Trata-se de uma alternativa comumente adotada pelas empresas de engenharia consultiva. Apesar de possuir um nível de subjetividade mais elevado, é de simples aplicação e, por isso, bastante indicado nos casos em que há pouco tempo disponível para a análise ou em que a aplicação dos métodos apresentados anteriormente represente um acréscimo de complexidade significativo à fase de análise de viabilidade do empreendimento.

O objetivo do método também é de se atribuir índices de sensibilidade ponderada à cada uma das variáveis envolvidas no processo. Entretanto, diferentemente dos demais métodos onde isso é feito a partir de análises matemáticas multivariáveis, utiliza-se a opinião dos especialistas da planta para inferir sobre tais índices.

É elaborado um questionário envolvendo todas as variáveis (processo e negócio) e pedindo que os especialistas opinem sobre o grau de impacto de cada variável de processo nas variáveis de negócio. Para uma maior padronização, este grau de impacto deve ser definido como Alto, Moderado ou Baixo, atribuindo-se pesos a cada um deles (ex.: 100%, 50% e 10%, respectivamente).

Os questionários são entregues ao maior número possível de especialistas daquele processo, sendo que é dada prioridade àqueles em mais contato com o dia-a-dia da operação.

Uma vez que se têm os questionários preenchidos, é feita uma compilação dos resultados extraindo-se a média das respostas.

Ao final, normaliza-se os graus de impacto de cada variável de processo em uma dada variável de negócio de forma que a soma dos índices resultantes seja 100%. Tais índices representam os Índices de Sensibilidade que se quer definir.

O Exemplo 4-4 tem caráter didático e ajuda a ilustrar o método.

Exemplo 4-4

É aplicado o método da opinião dos especialistas para se inferir sobre a sensibilidade de duas variáveis de negócio (Produtividade e Consumo Energético) em relação à quatro variáveis de processo (Vazão, Temperatura, Pressão e Nível).

A Figura 25 apresenta duas respostas de especialistas ao questionamento sobre o grau de impacto de cada variável de processo nas duas variáveis de negócio. A Figura 26 apresenta as mesmas respostas porém após terem sido atribuídos pesos à cada alternativa.

Respostas Especialista #1		
	Produtividade	Consumo Energético
Controle de Vazão	Alto	Baixo
Controle de Temperatura	Baixo	Alto
Controle de Pressão	Moderado	Moderado
Controle de Nível	Baixo	Baixo

Respostas Especialista #2		
	Produtividade	Consumo Energético
Controle de Vazão	Moderado	Baixo
Controle de Temperatura	Moderado	Alto
Controle de Pressão	Moderado	Moderado
Controle de Nível	Baixo	Moderado

Figura 25 – Respostas dos Especialistas (análise qualitativa)

Respostas Especialista #1		
	Produtividade	Consumo Energético
Controle de Vazão	100%	10%
Controle de Temperatura	10%	100%
Controle de Pressão	50%	50%
Controle de Nível	10%	10%

Respostas Especialista #2		
	Produtividade	Consumo Energético
Controle de Vazão	50%	10%
Controle de Temperatura	50%	100%
Controle de Pressão	50%	50%
Controle de Nível	10%	50%

Figura 26 – Respostas dos Especialistas (análise quantitativa)

A Figura 27 apresenta a compilação dos dois questionários após extrair-se as médias de cada resposta.

Respostas Combinadas		
	Produtividade	Consumo Energético
Controle de Vazão	75%	10%
Controle de Temperatura	30%	100%
Controle de Pressão	50%	50%
Controle de Nível	10%	30%

Figura 27 – Compilação das respostas

Finalmente, a Figura 28 apresenta os índices de sensibilidades calculados através da normalização dos pesos presentes na Figura 27.

Índices de Sensibilidade		
	Produtividade	Consumo Energético
Controle de Vazão	45%	5%
Controle de Temperatura	18%	53%
Controle de Pressão	30%	26%
Controle de Nível	6%	16%

Figura 28 – Índices de sensibilidade calculados

4.5.2 Análise baseada em eventos discretos

Recapitulando o que fora mencionado em 4.5, o ganho de um dado projeto pode surgir ao se promover uma mudança no comportamento das variáveis de interesse ou ao se evitar certos eventos operacionais indesejáveis.

A secção anterior (4.5.1) descreveu a proposta metodológica para cálculo do ganho potencial do projeto em termos de seu impacto no comportamento estatístico do processo. Nesta secção será descrita a análise para estimar o ganho potencial do projeto quando este está associado à redução na ocorrência de determinados eventos

operacionais indesejáveis. Trata-se de uma análise praticada por diversas empresas de engenharia consultiva.

Alguns exemplos de eventos operacionais discretos são:

- Paradas de planta ou equipamento;
- Transbordamentos;
- Ocorrências de sobrecarga;
- Ocorrências de produto fora da especificação;
- Re-processamento;
- Acidentes operacionais;
- Acidentes ambientais;
- Etc...

Propõe-se a realização deste tipo de análise a partir de três etapas:

- Levantamento dos dados históricos;
- Identificação das causas “evitáveis” de ocorrência de eventos
- Análise de sensibilidade e cálculo do ganho potencial

As sub-seções 4.5.2.1, 4.5.2.2 e 4.5.2.3 discutem cada uma delas.

4.5.2.1 Levantamento dos dados históricos

Para realização do levantamento de dados é necessário que a planta possua um sistema, automático ou não, para registro (e apontamento de causas) dos eventos operacionais relevantes. As principais informações a serem levantadas são:

- Natureza do evento;
- Área(s)/Equipamento(s) envolvido(s);
- Causa atribuída;
- Efeito no negócio (ex.: perda de produção, perda de qualidade, impacto ambiental, etc...)
- Data da ocorrência;
- Hora de Início / Hora de Fim;
- Operador / procedimentos operacionais;
- Matéria prima / Insumos;
- Critérios lógicos (controle automático)

Além disso, uma vez que se conhece o escopo de atuação do projeto, deve-se considerar apenas os eventos das áreas/unidades afetadas por aquele projeto, deixando de lado os eventos de outras áreas.

Importante observar, no entanto, que é comum a existência de impactos indiretos em eventos atrelados a unidades distintas daquela de atuação do projeto.

4.5.2.2 Identificação das causas “evitáveis” de ocorrência de eventos

Uma vez delimitado o universo de eventos a serem analisados respeitando a área de atuação do projeto, o próximo passo é o de definir quais desses eventos sofrem algum tipo de influência da automação e controle (as quais se propõe denominar “causas evitáveis”) e quais deles são causados por fatores externos à essa área de atuação. Essa análise pode apontar, por exemplo, que todas as paradas de um determinado equipamento são causadas por uma deficiência mecânica ou estrutural. Neste caso não há perspectiva de que a automação e o controle possam contribuir para a redução dessas paradas. Por outro lado, para um determinado equipamento pode-se concluir, por exemplo, que a grande maioria das interrupções em seu funcionamento decorre de deficiências na forma como fora implementada sua lógica discreta e analógica de funcionamento. Neste caso, automação e controle têm uma contribuição fundamental.

4.5.2.3 Análise de sensibilidade e cálculo do ganho potencial

Neste último passo a idéia é a de se estabelecer o grau de impacto da automação e controle em um determinado evento de causa evitável. Aqui, diferentemente do que ocorre no caso da análise estatística, não existem técnicas como a correlação cruzada e a matriz de variabilidade que permitam estimar o grau de impacto e consequentemente a sensibilidade dos eventos à automação e controle. Neste caso a análise acaba tendo que assumir uma abordagem um pouco mais subjetiva e dependente da interpretação de quem está desenvolvendo o estudo. No entanto, como o objetivo final do estudo é o de apresentar uma estimativa do benefício a ser alcançado com o projeto, é aceitável certo grau de imprecisão nesta etapa do empreendimento, como será discutido em 4.7.

Uma sugestão, então, é a de utilizar uma escala de impacto conforme o grau de influência em questão. Para situações onde a influência é considerada baixa, propõe-se estabelecer um grau de impacto de 0-25%. Para situações onde a influência é média, o grau de impacto deve ser estabelecido entre 25-75%. Finalmente, para situações onde a

influência é alta, deve se estabelecer um grau de impacto superior a 75%. O ideal é que especialistas da planta junto com especialistas nas disciplinas de automação sejam envolvidos no momento de definir estes valores percentuais.

Uma bom ponto de partida, entretanto, é assumir que em etapas mais iniciais do processo produtivo os desvios são mais explicados pela variabilidade da matéria prima do que pela variabilidade do controle. À medida em que se aproxima das etapas finais da produção, os desvios passam a ser mais explicados pelo controle e automação e menos pelas características da matéria prima. Com isso, a escala de impacto da automação tende a ser crescente ao longo do processo produtivo.

O grau de impacto se tornará o fator a ser multiplicado pela frequência de ocorrência de um determinado evento indesejável a fim de se determinar o potencial de redução na ocorrência deste evento.

Exemplo 4-5

Suponha-se uma determinada parada de equipamento/unidade cuja causa atribuída é dada como “falha na comunicação com o sistema de controle” e cuja duração acumula 120h em um dado ano. Imagine-se ainda que esteja em curso a estimação de ganhos de um projeto de reestruturação da rede de automação desta unidade. Fica claro que a influência do projeto neste tipo de parada é alta, portanto o grau de impacto deve ser superior a 75%, digamos 80%. Neste caso, o potencial de redução de paradas desta natureza com o projeto é de $80\% \times 120h = 96h$. Ou seja, com o projeto espera-se reduzir em 80% as paradas por “falha na comunicação com o sistema de controle” daquela unidade.

Neste caso específico o cálculo do ganho é feito de forma bem direta. Ou seja, uma vez identificado o fator de redução da ocorrência dos eventos, e conhecendo-se qual o efeito na(s) variável(is) de negócio associada(s), basta se multiplicar o percentual de redução pelo fator que quantifica as perdas e prejuízos.

Por exemplo, no caso de redução de paradas de equipamentos, basta fazer uma projeção de quantas horas anuais de parada serão evitadas com o empreendimento. A partir daí basta se multiplicar este quantitativo de horas pela taxa de produção efetiva do equipamento/unidade, chegando-se a perda de produção que seria evitada. Sabendo-se o valor da margem líquida do produto, tem-se a estimativa do valor financeiro a ser economizado com a redução nas paradas.

4.6 Passo 6 – Analisar a viabilidade financeira do empreendimento

Estimado o ganho potencial do projeto em análise tem-se, como último passo da proposta metodológica, a análise de viabilidade financeira do empreendimento. Tal análise de viabilidade consiste, basicamente, em se confrontar o ganho potencial calculado com os custos de implantação do projeto e verificar se, neste confronto, os ganhos do projeto superam os custos de material, serviços e financeiros associados ao empreendimento.

As técnicas mais comumente aplicadas para realizar tal análise são aquelas apresentadas na seção 3.3.

4.7 Considerações sobre níveis de incerteza

Conforme enfatizado nos capítulos iniciais, a metodologia proposta tem a intenção de ser aplicada nas etapas iniciais do empreendimento. Não se pode exigir uma estimativa exata a esta altura do projeto. Por mais sistemática e consistente que seja a metodologia, ela sempre irá partir de premissas que precisam se confirmar e se utilizará de dados estatísticos para fornecer os resultados, fazendo com que haja um grau de incerteza na estimativa.

O Guia PMBoK (*Project Management Institute*, 2004), ao falar sobre as incertezas na estimativa de custos de projetos, estabelece como aceitável uma imprecisão de -50% a +100% nas etapas mais iniciais. Numa etapa posterior, conforme mais informações são conhecidas, as estimativas podem se reduzir a uma faixa de -10 a +15%. Da mesma maneira o *Independent Project Analysis* (2010) prevê para a etapa de Análise de Negócio do Modelo FEL o desenvolvimento de uma faixa estimada dos custos do projeto com uma tolerância típica à -25/+40% de imprecisão.

Raciocínio semelhante deve ser aplicado à estimativa de benefícios. Ou seja, deve-se assumir um nível de imprecisão inicial e executar a metodologia de forma recorrente à medida em que mais dados e detalhes se fazem disponíveis.

Independentemente disso, sempre existirá um nível de subjetividade e, conseqüentemente, um grau de imprecisão. Entretanto os níveis de imprecisão alcançados aplicando-se uma metodologia como esta são consideravelmente menores do que os de uma análise não sistemática.

4.8 Comentários Finais

Neste capítulo foram apresentados os seis passos da metodologia proposta para a estimação de ganhos em projetos de automação e controle.

Os aspectos considerados fundamentais para o sucesso na aplicação desta metodologia são:

- Um bom entendimento do projeto e do que ele se propõe a transformar;
- Um bom entendimento dos objetivos estratégicos da companhia, principalmente da sua área de produção;
- Disponibilidade de dados históricos de processo e de operação que permitam caracterizar o cenário pré-projeto.

Sobre este último item, é importante ressaltar que nem sempre os dados por si só são suficientes para a caracterização do cenário. O envolvimento de especialistas do processo também pode ser considerado fundamental para que sejam fornecidas as informações complementares para análise – aquelas informações chave que não se encontra em gráficos de tendência, relatórios de produção, telas de processo ou mapa de falhas.

Outro comentário importante é acerca das técnicas para análise de sensibilidade. Das quatro técnicas apresentadas, apenas o Método da Matriz de Variabilidade Adaptado e o Método Baseado em PLS têm o resultado da sua aplicação já levando em consideração as inter-relações que existem no conjunto de variáveis de processo. Isso pode representar um diferencial destas técnicas no que diz respeito à acuracidade do resultado uma vez que mais dinâmicas são incorporadas na análise.

Para as técnicas mais elaboradas apresentadas no capítulo, procurou-se ilustrá-las com exemplos didáticos de forma a garantir o entendimento quanto à sua aplicação. Entretanto, cada um destes exemplos ficou limitado àquela técnica específica.

Ao contrário destes exemplos, os estudos de caso que serão apresentados no próximo capítulo visam ilustrar a utilização combinada de todos os passos da metodologia. São apresentados ao todo três casos reais de projetos sobre os quais foram aplicadas as técnicas de estimação de benefícios propostas pela metodologia.

5 ESTUDOS DE CASO

Três estudos de caso são apresentados visando evidenciar a aderência e o caráter prático da metodologia proposta. Os casos são baseados em processos e dados reais, refletindo aspectos comuns ao dia-a-dia das grandes empresas.

Os dois primeiros estudos ilustram a aplicação da metodologia em sua íntegra. O primeiro com um enfoque maior para a análise baseada no comportamento estatístico do processo, enquanto o segundo se utiliza da análise baseada em eventos discretos.

Concluindo o capítulo, o terceiro estudo de caso ilustra como alguns conceitos propostos podem ser também utilizados no pós-projeto, ou seja, quando a intenção é de medir efetivamente os resultados alcançados e não de fazer projeções futuras.

5.1 Estudo de Caso #1 – Implementação de um sistema para controle avançado de Espessadores de Rejeito

5.1.1 Descrição do processo

Espessadores são equipamentos industriais que utilizam o princípio da sedimentação para promover uma separação sólido-líquido. Estes equipamentos estão muito presentes na indústria de mineração onde é comum classificá-los como:

- Espessadores de Concentrado (ou Polpa) – recebe a polpa homogênea e separa a água do minério. A água representa o *overflow* do espessador enquanto o minério é coletado a partir do *underflow* do espessador para virar produto.
- Espessadores de Lama (ou Rejeito) – recebe o rejeito da produção e separa a água da lama. Novamente a água é o *overflow* do espessador e segue sendo re-utilizada no processo. Já a lama é coletada pelo *underflow* do espessador e encaminhada à barragem.

Em geral os espessadores utilizam uma pá de baixa rotação utilizada para homogeneizar o conteúdo do tanque e também para acelerar o processo de sedimentação. Em alguns casos, são adicionadas ao espessador reagentes com propriedades flocculantes para acelerar ainda mais este processo. Quanto mais rápido o processo de sedimentação e quanto melhor for a separação sólido-líquido, mais eficiente é o espessador.

A Figura 29 mostra a tela de operação do sistema de captação e recuperação de água de uma dada companhia mineradora de ferro. Na parte superior da tela podem ser vistos dois Espessadores de Lama. Estes espessadores recebem todo o rejeito do processo dessa mineradora e promovem a separação água-lama. A água que sai no *overflow* é reaproveitada nos demais processos úmidos da unidade enquanto a lama é encaminhada à barragem. Somente a água separada por este processo de espessamento não é suficiente para suprir toda a demanda da usina, por isso é utilizada água bruta proveniente de lagos e represas próximas como uma forma de complementar o suprimento aos processos úmidos. Entretanto, quanto maior a eficiência desses espessadores, maior a quantidade de água reaproveitada e menor a necessidade por água bruta. Isso é algo positivo não só pela redução do impacto ao meio ambiente como também pelo fato de reduzir o consumo energético decorrente do bombeamento de água bruta.

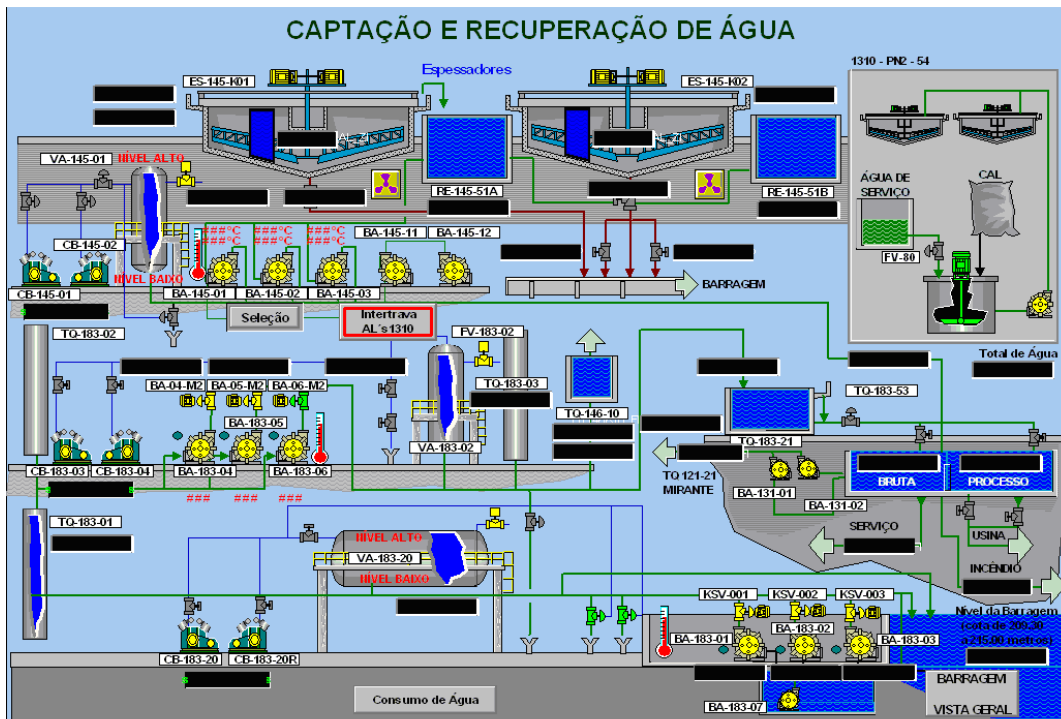


Figura 29 – Tela de operação do Sistema de Captação e Recuperação de Água

5.1.2 Descrição do problema

O apelo pela redução de custos operacionais sempre esteve presente na realidade da indústria. Em cenários de instabilidade econômica ou de forte concorrência, este apelo se torna ainda maior.

Um importante elemento na composição dos custos operacionais de uma indústria é o seu consumo energético. Quanto maior a eficiência energética de uma companhia, menores são seus custos específicos e maior a sua competitividade.

O desafio do processo alvo deste estudo de caso é o de reduzir o consumo energético associado ao bombeamento de água bruta da barragem para o processo. Tal consumo representa uma parcela significativa na demanda energética total da planta em questão.

A proposta é de se melhorar o controle dos espessadores de rejeito de forma que estes se tornem mais eficientes, recuperando mais água do processo e reduzindo a demanda por água bruta (nova). Essa redução de demanda por água bruta representa, naturalmente, uma redução no consumo energético das bombas da barragem.

5.1.3 Escopo do projeto

O escopo do projeto pode ser melhor caracterizado a partir do levantamento de informações proposto pelo Passo 1 da metodologia descrita no capítulo 4 (ver 4.1).

A

Tabela 8 lista tais informações para o projeto em análise no presente estudo de caso.

5.1.4 Estimação de ganhos do projeto

5.1.4.1 Passo 1 – Entendimento do Escopo do Projeto

Para o entendimento do escopo do projeto são levantadas as informações apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Informações do projeto

Título do Projeto	Sistema para controle avançado de espessador de rejeito
Justificativa	Forte pressão para redução de custos operacionais, dentre eles o custo associado ao consumo de energia elétrica
Objetivo	Melhorar o controle do espessamento de rejeito, aumentando a sua eficiência na recuperação de água de processo e reduzindo a demanda de captação de água bruta
Metodologia	- Levantamento e análise de dados; - Análise preliminar das condições da instrumentação e dos sistemas de controle; - Definição das limitações de equipamentos e restrições de processo; - Definição da estratégia de controle avançado; - Especificação do sistema de controle avançado; - Instalação do sistema; - Comissionamento e testes; - Start-up; - Operação Assistida; - Treinamentos;
Áreas físicas envolvidas	Usina/Unidade de Beneficiamento/Operação Unitária de Espessamento/Espessadores de Rejeito
Níveis de atuação do projeto	Controle e supervisão
Variável(is) de negócio impactada(s)	Custo Operacional; Impacto Ambiental;
Variáveis de processo impactadas/impactantes	Taxa de Alimentação de Ferro do Peneiramento II Taxa de Alimentação de Ferro da Moagem Densidade de Underflow dos Espessadores Vazão de Floculante
Evento(s) operacional(is) discreto(s) impactado(s)	N/A
Prazo	4 meses
Orçamento	400.000,00 u.m. (unidades monetárias)
Custos Operacionais Incorridos	0,00 u.m. (justificativa: a implantação do projeto pode ser realizada com a planta em funcionamento)

5.1.4.2 Passo 2 – Identificação dos direcionadores de negócio impactados pelo projeto

Os direcionadores de negócio impactados pelo projeto são:

- Custo operacional – uma vez que uma parcela deste custo está associada ao consumo energético do bombeamento de água bruta das barragens;

- Impacto ambiental – uma vez que a redução da demanda por água bruta e a sua substituição por água recuperada do próprio processo favorece a preservação do meio ambiente.

O indicador utilizado para medir o impacto no negócio denomina-se Taxa de Reuso. Trata-se de um índice percentual que mede a razão entre o volume de água recuperada no espessador e o volume de água total utilizado no processo (água recuperada + água bruta bombeada da barragem) por unidade de tempo.

$$TR(\%) = \frac{VR}{VR + VB} = \frac{VR}{VT} \quad \text{Equação 5-1}$$

Onde

- TR é a Taxa de Reuso (%)
- VR é o Volume de Água Recuperada (m³/dia)
- VB é o Volume de Água Bruta (m³/dia)
- VT é o Volume Total de Água (VR + VB)

5.1.4.3 Passo 3 – Identificação das variáveis de processo que têm influência sobre os direcionadores de negócio

As variáveis de processo que têm influência sobre a Taxa de Reuso são:

- Taxa de Alimentação de Ferro do Peneiramento II (t/dia)
- Taxa de Alimentação de Ferro da Moagem (t/dia)
- Densidade Média de Underflow do Espessador 01 (g/cm³)
- Densidade Média de Underflow do Espessador 02 (g/cm³)
- Vazão Média de Flocculante (m³/h)

Dentre essas variáveis apenas as três últimas (Densidade Espessador 01, Densidade Espessador 02 e Vazão de Flocculante), sofrem impacto do escopo do projeto.

5.1.4.4 Passo 4 – Levantamento de dados

Para todas as variáveis mencionadas nos itens 5.1.4.2 e 5.1.4.3, existem registros históricos disponíveis em planilhas eletrônicas. A periodicidade de registro dos dados é diária, como mostra o exemplo da Figura 30.

Acompanhamento e Monitoramento dos ICD's GRH

DIA	Alimentação de Ferro - ROM (ton)						Cons. Esp. Água Bruta		Taxa de Reuso de Água (%)						Horímetro Galeria da Mina (min)					
	Usina - P/MI		MOAGEM		Total		Diário	Acum.	Turno 1	Turno 2	Turno 3	Diário	Acum.	Por Turno		Total				
	Diário	Acum.	Diário	Acum.	Diário	Acum.								Turno 1	Turno 2	Turno 3	Diário	Acum.	Turno 1	Turno 2
1-jul	283.224	283.224	18.898	18.898	302.122	302.122	0,257	0,257	65,49	65,49	63,14	63,14	58,74	58,74	380	540	540	1440	1440	5.060
2-jul	285.840	569.064	19.523	38421	305.363	674.485	0,227	0,242	66,55	62,86	61,81	60,96	59,82	380	540	540	1440	1440	2.880	1.407
3-jul	285.828	854.892	17.990	56211	303.818	978.303	0,241	0,242	63,47	59,47	63,21	59,98	59,83	380	540	540	1440	1440	4.320	397
4-jul	283.576	1.138.468	21.528	77749	305.104	1.283.407	0,224	0,237	66,06	62,46	61,93	61,09	60,35	380	540	540	1440	1440	5.760	558
5-jul	290.441	1.428.909	19.261	97010	309.702	1.593.109	0,207	0,231	62,74	61,89	65,64	62,38	60,58	380	540	540	1440	1440	7.200	1.092
6-jul	294.280	1.723.189	21.328	118338	315.608	1.908.717	0,222	0,229	62,59	60,46	62,94	59,85	60,46	380	540	540	1440	1440	8.640	1.194
7-jul	287.284	2.010.473	21.144	139482	308.428	2.148.145	0,239	0,231	61,89	63,77	59,51	59,42	60,31	380	540	540	1440	1440	10.080	2.421
8-jul	292.336	2.302.809	21.400	160882	313.736	2.461.881	0,212	0,228	65,87	66,52	64,50	64,04	60,79	380	540	540	1440	1440	11.520	3.895
9-jul	291.962	2.594.771	19.692	179934	311.654	2.773.535	0,208	0,235	63,57	66,92	69,51	64,79	60,17	380	540	0	900	1.080	12.420	5.077
10-jul	293.404	2.888.175	21.202	201136	314.606	3.088.141	0,504	0,245	64,02	66,92	69,51	64,79	60,17	380	540	540	1440	1440	13.860	6.004
11-jul	109.400	2.997.575	20.940	222076	130.341	3.218.582	0,458	0,255	65,43	62,38	62,66	62,66	57,32	380	540	540	1440	1440	15.300	5.300
12-jul	311.158	3.308.733	21.060	243136	332.218	3.550.799	0,199	0,249	61,33	68,11	69,36	63,65	58,46	380	540	540	1440	1440	16.740	2.845
13-jul	291.931	3.600.664	13.125	256261	305.056	3.855.855	0,229	0,248	62,16	68,43	62,33	60,55	58,63	380	540	540	1440	1440	18.180	5.085
14-jul	319.847	3.920.511	16.989	273250	336.836	4.192.691	0,217	0,245	66,62	63,68	67,65	69,08	58,66	380	540	540	1440	1440	19.620	19.620
15-jul	294.171	4.214.682	22.185	294435	316.356	4.509.047	0,217	0,243	63,41	65,43	67,32	69,68	58,73	0	540	540	1440	1.080	20.700	3.756
16-jul	282.027	4.496.709	18.899	313434	290.926	4.800.073	0,244	0,243	69,11	67,16	68,76	68,43	58,72	380	540	540	1440	1440	22.140	3.135
17-jul	287.394	4.784.103	15.052	328486	292.446	5.092.519	0,272	0,245	65,37	63,81	66,85	64,35	58,45	240	390	540	1440	1.170	23.310	5.556
18-jul	303.142	5.087.245	12.192	340678	315.334	5.402.853	0,230	0,244	64,87	67,23	62,72	65,98	58,31	380	540	420	1.290	24.600	3.569	
19-jul	285.738	5.372.983	18.853	359531	284.591	5.687.444	0,249	0,244	68,13	64,65	68,79	66,82	58,23	380	240	0	800	25.200	1.138	
20-jul	294.580	5.667.563	19.522	379053	314.102	6.001.546	0,236	0,244	61,71	69,72	68,77	67,01	58,17	210	540	540	1.290	26.490	3.129	
21-jul	306.516	6.074.079	22.044	399097	328.560	6.330.106	0,242	0,243	67,42	69,62	66,77	68,19	67,77	380	540	540	1440	1.440	27.930	2.428
22-jul	285.850	6.359.929	24.596	423693	310.446	6.640.552	0,258	0,244	69,01	68,01	68,57	69,29	67,39	380	540	540	1440	1.440	29.370	6.202
23-jul	332.244	6.692.173	15.572	439265	347.816	7.088.368	0,234	0,244	66,32	60,45	66,65	62,31	57,17	380	540	240	1.140	30.510	951	
24-jul	283.654	6.975.827	17.796	457061	301.450	7.390.218	0,281	0,245	66,40	60,00	67,09	60,35	56,89	170	390	540	1.100	31.610	3.626	
25-jul	285.696	7.261.523	20.549	476810	286.245	7.676.463	0,244	0,245	61,01	63,63	66,86	65,78	56,85	380	540	380	1.260	32.870	1.740	
26-jul	288.458	7.549.981	18.717	495727	287.175	7.963.638	0,260	0,246	63,36	69,30	68,26	65,89	56,81	80	0	380	440	33.310	2.428	
27-jul	286.330	7.836.311	18.604	514331	304.934	8.268.572	0,229	0,245	69,28	64,13	68,49	69,12	56,98	0	420	420	820	34.130	2.428	
28-jul	309.830	8.146.141	19.893	533724	329.723	8.598.295	0,228	0,244	66,40	64,51	67,51	67,18	56,91	380	0	0	380	34.510	6.888	
29-jul	338.640	8.484.781	20.172	553896	358.812	8.957.107	0,261	0,245	63,38	66,42	69,65	61,79	56,70	320	0	540	860	34.950	6.237	
30-jul	244.418	8.729.199	20.558	574354	264.976	9.212.175	0,309	0,247	61,15	65,67	67,16	62,95	56,57	380	0	0	380	35.330	7.324	
31-jul	124.608	8.853.807	19.960	594214	135.568	9.047.643	0,565	0,252	63,24	66,77	63,57	63,48	56,48	0	0	0	0	35.310	3.303	
1-ago	230.532	9.084.339	18.652	612866	249.184	9.296.527	0,317	0,317	68,44	67,28	62,99	66,31	56,31	380	270	540	1.170	36.480	1.400	
2-ago	291.864	9.376.203	22.060	634926	273.924	9.570.451	0,276	0,296	61,97	62,28	63,98	68,02	58,21	380	220	420	920	3.090	10.367	
3-ago	289.732	9.665.935	21.894	656820	311.626	9.882.077	0,236	0,274	66,44	67,38	65,18	69,70	56,70	380	540	540	1.440	3.590	11.400	
4-ago	294.700	9.960.635	22.472	679292	317.172	10.199.249	0,226	0,259	64,46	64,88	67,60	68,10	60,67	380	640	640	1.440	4.970	11.960	

Figura 30 – Exemplo de planilha de registros históricos de indicadores

5.1.4.5 Passo 5 – Estimação do ganho potencial

Uma vez que o objetivo do projeto é o de se melhorar o controle do espessamento de rejeito, aumentando a sua eficiência na recuperação de água de processo (Taxa de Reuso), para estimação do ganho potencial utiliza-se a análise baseada no comportamento estatístico.

5.1.4.5.1 Passo 5.1 – Tratamento dos dados históricos

Para garantir que a análise seja feita tomando-se como base apenas períodos de operação regular da planta, é realizado um pré-tratamento dos dados históricos coletados. Este pré-tratamento consiste basicamente na remoção de outliers e de regimes transitórios presentes nos dados brutos. Para tal, são criadas cartas de controle de Shewart (Montgomery, 2004) para as variáveis e, através dos limites superior e inferior de controle, são identificados os outliers. Antes de se eliminar tais outliers certifica-se se há causas atribuíveis para os mesmos. Aqueles cujas causas atribuíveis puderam ser identificadas são eliminados da base de dados de análise.

A Figura 31 mostra a carta de controle construída para a variável “Taxa de Reuso” após a eliminação dos outliers.

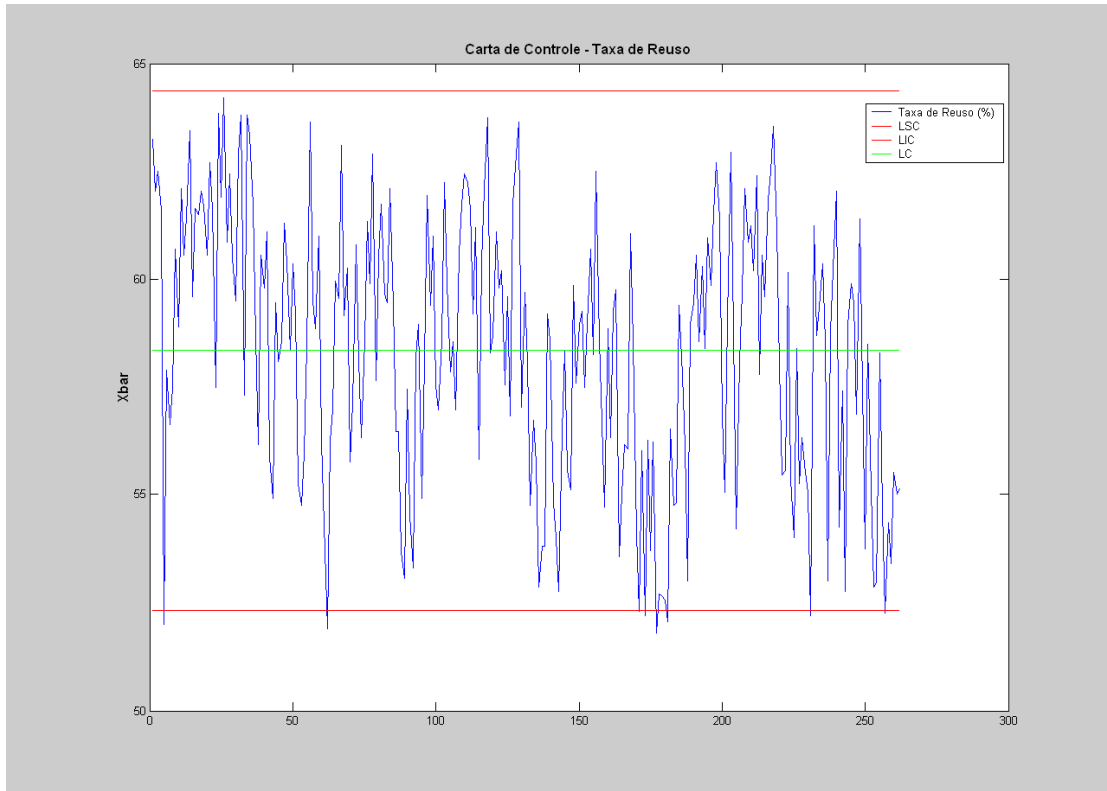


Figura 31 – Carta de controle da Taxa de Reuso

5.1.4.5.2 Passo 5.2 – Identificação da janela de oportunidade

Para identificação da janela de oportunidade da variável de negócio Taxa de Reuso (%) foi escolhido o *método da variabilidade capaz* (4.5.1.1.1), não havendo, entretanto, motivo específico que justifique a escolha em detrimento dos demais métodos neste caso.

Primeiramente são calculadas a média e o desvio padrão amostral total (variabilidade total) da variável.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i)}{n} = 57\% \quad \text{Equação 5-2}$$

$$S_{tot} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 5,2\% \quad \text{Equação 5-3}$$

Em seguida, é calculada, pelo método da *Média da Faixa Móvel*, a variabilidade capaz da Taxa de Reuso utilizando a Equação 4-4 e Equação 4-5.

$$MR = \sum_{i=2}^n \frac{|X_i - X_{i-1}|}{(n-1)} = 3,1 \quad \text{Equação 5-4}$$

$$S_{cap} = \frac{MR}{d_2} = \frac{3,1}{1,128} = 2,7\% \quad \text{Equação 5-5}$$

A janela de oportunidade calculada pelo método da variabilidade capaz é representada pelo deslocamento da média na Taxa de Reuso possível de ser realizado em decorrência da redução de variabilidade estimada para o indicador.

De posse dos valores de variabilidade total e variabilidade capaz, estimados nos passos anteriores, o deslocamento possível da média é dado pela Equação 4-9, sendo que para o parâmetro X_L é atribuído o valor de 100% por ser a restrição máxima da Taxa de Reuso (equivale a utilizar no processo somente água recuperada, sem demanda por água bruta).

$$\Delta X = \left(1 - \frac{S_{cap}}{S_{tot}}\right) \cdot (X_L - \bar{X}_{antigo}) \quad \text{Equação 5-6}$$

$$\Delta X = \left(1 - \frac{2,7}{5,2}\right) \cdot (100 - 57) = 20,7\% \quad \text{Equação 5-7}$$

Janela de Oportunidade = 20,7%

5.1.4.5.3 Passo 5.3 – Análise de sensibilidade e cálculo do ganho potencial

Para a análise de sensibilidade foi escolhido o *Método da Correlação Cruzada* (4.5.1.2.2). Optou-se por este método por duas razões: 1) o número de variáveis dependentes não é elevado o que torna desnecessária a aplicação do método baseado em PLS cuja implementação tende a ser mais complexa; 2) as variáveis independentes são fortemente acopladas, dificultando a construção da Matriz de Variabilidade (que implica na seleção de momentos em que certa variável tem sua variabilidade alterada enquanto as outras permanecem estáveis).

Aplicando a Equação 4-25 sobre cada par formado pela variável de negócio com as variáveis de processo, são encontrados os coeficientes de correlação ρ entre tais variáveis, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes de Correlação

	Coeficiente de Correlação (ρ) com a Taxa de Reuso
Alimentação de Ferro do Peneiramento II	0,28
Alimentação de Ferro da Moagem	0,07
Densidade Média de Underflow do Espessador 01	0,24
Densidade Média de Underflow do Espessador 02	0,29
Vazão Média de Floculante	0,02

Em seguida, aplicando a Equação 4-26 sobre os coeficientes de correlação apresentados na Tabela 9, são calculados os índices de *sensibilidade ponderada (SP)* da Taxa de Reuso. Os resultados são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Índices de Sensibilidade Ponderada

	Índice de Sensibilidade Ponderada (SP) da Taxa de Reuso
Alimentação de Ferro do Peneiramento II	30,8%
Alimentação de Ferro da Moagem	7,9%
Densidade Média de Underflow do Espessador 01	26,6%
Densidade Média de Underflow do Espessador 02	32,1%
Vazão Média de Floculante	2,6%
TOTAL	100%

Uma vez que, como fora mencionado em 5.1.4.3, o escopo do projeto têm impacto apenas sobre as três últimas variáveis, os pesos que devem ser considerados para a estimação do ganho potencial são apenas os relativos a estas variáveis. Sendo assim, tem-se conforme Equação 4-17:

$$Ganho_Potencial_Estimado = \sum_j \left[\left(\sum_k SP_{kj} \right) \cdot janela_oportunidade_j \right] \quad \text{Equação 5-8}$$

$$Ganho_Potencial_Estimado = (26,6\% + 32,1\% + 2,6\%) \cdot 20,7 \quad \text{Equação 5-9}$$

$Ganho_Potencial_Estimado = 12,7\%$

Este resultado implica em dizer que, com o projeto, espera-se que o valor médio da Taxa de Reuso passe dos atuais 57% para **69,7%**.

5.1.4.6 Passo 6 – Análise de viabilidade financeira do empreendimento

Para analisar a viabilidade financeira deste empreendimento deve-se confrontar, utilizando uma ou mais técnicas apresentadas na secção 4.6, o orçamento previsto para

o projeto com o ganho potencial calculado. Naturalmente, antes de proceder com a aplicação das técnicas, é necessário traduzir o ganho potencial estimado (12,7%) em valores monetários.

Para este estudo de caso em específico, o racional de cálculo para traduzir em valores monetários o ganho potencial estimado é o que se apresenta nos parágrafos a seguir.

De acordo com a Equação 5-1 e considerando-se que a média diária do volume de total de água (\overline{VT}) utilizado no processo é igual à 226.514 m³/dia (ref.: levantamento de dados), tem-se:

$$\overline{TR}_{ATUAL} (\%) = \frac{\overline{VR}_{ATUAL}}{\overline{VT}_{ATUAL}} \quad \text{Equação 5-10}$$

$$57\% = \frac{\overline{VR}_{ATUAL}}{226514m^3/dia} \quad \text{Equação 5-11}$$

$$\overline{VR}_{ATUAL} = 129113 m^3/dia \quad \text{Equação 5-12}$$

$$\overline{VB}_{ATUAL} = \overline{VT}_{ATUAL} - \overline{VR}_{ATUAL} = 97401 m^3/dia \quad \text{Equação 5-13}$$

Mantendo-se constante a média diária do volume total de água utilizado no processo - \overline{VT} - (o que é razoável uma vez que a demanda de água do processo é um fator externo e absolutamente desvinculado do projeto em questão), tem-se:

$$\overline{TR}_{POTENCIAL} (\%) = \frac{\overline{VR}_{POTENCIAL}}{\overline{VT}_{ATUAL}} \quad \text{Equação 5-14}$$

$$69,7\% = \frac{\overline{VR}_{POTENCIAL}}{226514m^3/dia} \quad \text{Equação 5-15}$$

$$\overline{VR}_{POTENCIAL} = 157880 m^3/dia \quad \text{Equação 5-16}$$

$$\overline{VB}_{POTENCIAL} = \overline{VT} - \overline{VR}_{POTENCIAL} = 68634 \text{ m}^3/\text{dia} \quad \text{Equação 5-17}$$

$$\boxed{\overline{VB}_{ATUAL} - \overline{VB}_{POTENCIAL} = 28767 \text{ m}^3/\text{dia}} \quad \text{Equação 5-18}$$

O último resultado significa dizer que, com o projeto, espera-se reduzir em 28.767 m³/dia o consumo de água bruta.

Considerando-se que, para cada m³ de água bruta bombeado da barragem, gasta-se 0,06 unidades monetárias (u.m.) em energia de bombeamento, o ganho financeiro anual com o projeto pode ser estimado como:

$$(28767 \text{ m}^3/\text{dia}) \times (365 \text{ dias}) \times (0,06 \text{ u.m./m}^3) \cong \mathbf{630.000,00 \text{ u.m./ano}}$$

De posse dos valores monetários referentes ao investimento do projeto e ao ganho potencial estimado, pode-se proceder com a aplicação das técnicas de análise de viabilidade financeira. Apesar de a aplicação de uma ou duas técnicas já ser suficiente para a realização da análise na maioria dos casos, para efeito de ilustração, serão aplicados todos os métodos propostos em 4.6.

Método do Valor Presente

Assumindo-se uma taxa de desconto de 10% a.a., tem-se:

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^n} = \frac{630000,00}{(1+0,1)^1} = 623762,37 \text{ u.m.} \quad \text{Equação 5-19}$$

Método do Valor Presente Líquido

Para utilizar o método do VPL, o mais adequado é distribuir o ganho potencial calculado com base anual nos meses subsequentes ao projeto. É razoável assumir uma distribuição homogênea ao longo dos meses uma vez que o volume mensal de água utilizada praticamente não varia ao longo do ano. Além disso, pode-se assumir também que os ganhos só se consolidam após a conclusão do projeto, ou seja, o fluxo de caixa é negativo nos meses de implantação.

A

Tabela 11 apresenta a memória de cálculo do VPL para o projeto assumindo uma taxa de desconto de 0,8% a.m.

Taxa Interna de Retorno (TIR)

Como fora mencionado, para o cálculo da TIR o mais apropriado e eficaz é a utilização de calculadoras financeiras ou planilhas eletrônicas. Para este estudo de caso foi utilizada a função *TIR(valores, estimativa)* do software Microsoft Excel®.

Tabela 11 – Cálculo do VPL

	Fluxo de Caixa	VP
Mês 1	-100.000	= -100.000
Mês 2	-100.000	$= \frac{-100.000}{(1 + 0,008)^1} = -99.206$
Mês 3	-100.000	$= \frac{-100.000}{(1 + 0,008)^2} = -98.419$
Mês 4	-100.000	$= \frac{-100.000}{(1 + 0,008)^3} = -97.638$
Mês 5	+52.500	$= \frac{52.500}{(1 + 0,008)^4} = 50.853$
Mês 6	+52.500	$= \frac{52.500}{(1 + 0,008)^5} = 50.449$
Mês 7	+52.500	= 50.049
Mês 8	+52.500	= 49.652
Mês 9	+52.500	= 49.258
Mês 10	+52.500	= 48.867
Mês 11	+52.500	= 48.479
Mês 12	+52.500	= 48.094
Mês 13	+52.500	= 47.713
Mês 14	+52.500	= 47.334
Mês 15	+52.500	= 46.958
Mês 16	+52.500	= 46.586
	VPL	= 189.029

Esta função retorna a taxa interna de retorno de uma seqüência de fluxos de caixa representada pelos números em valores. Os fluxos de caixa devem ser feitos em intervalos regulares, como mensalmente ou anualmente.

Parâmetros:

- *valores* - é uma matriz ou uma referência a células que contém números cuja taxa interna de retorno se deseja calcular.

- Valores deve conter pelo menos um valor positivo e um negativo para calcular a taxa interna de retorno.
- TIR usa a ordem de valores para interpretar a ordem de fluxos de caixa. Os valores de pagamentos e rendas devem ser inseridos na seqüência desejada.
- **estimativa** - é um número que se estima ser próximo do resultado de TIR.
 - O Microsoft Excel usa uma técnica iterativa para calcular TIR. Começando por estimativa, TIR refaz o cálculo até o resultado ter uma precisão de 0,00001 por cento. Se TIR não puder localizar um resultado que funcione depois de 20 tentativas, um valor de erro será retornado e uma nova estimativa deve ser passada.
 - Na maioria dos casos, não é necessário fornecer estimativa para o cálculo de TIR. Se estimativa for omitida, será considerada 0,1 (10 por cento).

A Figura 32 apresenta o cálculo da TIR para o presente estudo de caso utilizando o Microsoft Excel.

Período	Fluxo de Caixa (u.m.)	Descrição
Mês 1	-100000	Orçamento do 1o mês de implantação do projeto
Mês 2	-100000	Orçamento do 2o mês de implantação do projeto
Mês 3	-100000	Orçamento do 3o mês de implantação do projeto
Mês 4	-100000	Orçamento do 4o mês de implantação do projeto
Mês 5	52500	A receita líquida do 1o mês após a conclusão do projeto
Mês 6	52500	A receita líquida do 2o mês após a conclusão do projeto
Mês 7	52500	A receita líquida do 3o mês após a conclusão do projeto
Mês 8	52500	A receita líquida do 4o mês após a conclusão do projeto
Mês 9	52500	A receita líquida do 5o mês após a conclusão do projeto
Mês 10	52500	A receita líquida do 6o mês após a conclusão do projeto
Mês 11	52500	A receita líquida do 7o mês após a conclusão do projeto
Mês 12	52500	A receita líquida do 8o mês após a conclusão do projeto
Mês 13	52500	A receita líquida do 9o mês após a conclusão do projeto
Mês 14	52500	A receita líquida do 10o mês após a conclusão do projeto
Mês 15	52500	A receita líquida do 11o mês após a conclusão do projeto
Mês 16	52500	A receita líquida do 12o mês após a conclusão do projeto
TIR	6% a.m.	

Figura 32 – Exemplo de planilha eletrônica para cálculo da Taxa Interna de Retorno

A empresa em questão opera com uma taxa de atratividade de 12% a.a. Sendo assim, o valor da TIR obtido de 6% a.m. (72% a.a.) torna o empreendimento atrativo e viável do ponto de vista financeiro para tal companhia.

Retorno contábil sobre o investimento (ROI)

O retorno contábil sobre o investimento é a relação entre o lucro líquido e o custo total do investimento. Para este estudo de caso tem-se:

$$ROI(\%) = \frac{Re\ ceita - Custo}{Custo} = \frac{Re\ ceita}{Custo} - 1 \quad \text{Equação 5-20}$$

$$ROI(\%) = \frac{630.000,00}{400.000,00} - 1 = \mathbf{58\%} \quad \text{Equação 5-21}$$

Período de *payback* do investimento

Para calcular o *payback* basta dividir o custo total do investimento pelos retornos periódicos esperados com o projeto.

$$Payback(em_meses) = \frac{Custo_Investimento}{Receita_por_mês} \quad \text{Equação 5-22}$$

$$Payback(em_meses) = \frac{400000,00}{52500,00} = \mathbf{7,6} \quad \text{Equação 5-23}$$

Ou seja, o projeto se pagaria ao final do oitavo mês subsequente à sua implementação.

5.2 Estudo de Caso #2 – Implementação de controle automático de alimentação em linhas de peneiramento de uma unidade de beneficiamento mineral

5.2.1 Descrição do processo

No processo de beneficiamento de minérios, a etapa de peneiramento é aquela que promove a separação das partículas de materiais granulares através de uma superfície perfurada (Pentec Industrial, 2004). Em geral são utilizados equipamentos de grande porte denominados “Peneiras Vibratórias” para este fim.

A alimentação da peneira deve ser aquela que esteja dentro da carga máxima permitida no projeto, procurando-se sempre evitar que a mesma trabalhe constantemente sobrecarregada ou vazia.

Uma vez que o material esteja sobre a superfície de peneiramento, ocorrem dois processos que possibilitam a classificação:

- a) **Estratificação** - É o processo que ocorre na camada de material por efeito do movimento. As partículas menores, escoando através dos vãos criados pelas partículas maiores, encaminham-se para a parte inferior da camada, indo de encontro com a superfície de peneiramento. Obviamente, as partículas maiores ocupam a parte superior da camada.
- b) **Separação** - A separação de uma dada partícula é uma função da relação entre o seu tamanho e a abertura da tela. Quanto maior for a diferença entre ambos, mais facilmente passam ou são rejeitadas pela tela. Quanto mais homogêneo o material a ser peneirado e, quanto menor a diferença de tamanho; malha/partícula, maiores são as dificuldades de peneiramento.

A eficiência de peneiramento é a qualidade de separação que a peneira fornece, sendo mensurada pelos fatores:

- Eficiência de remoção dos passantes (peneiramento para over size, ou escolha das partículas não passantes) - Aqui o produto considerado válido é o material retido na tela.
- Eficiência de recuperação dos passantes (peneiramento para under size ou seja, o material fino que passa pela tela) - Aqui o produto considerado é o material passante na tela.

Uma peneira com baixa eficiência permitirá que mais finos (produto final) sejam carregados juntamente com material não passante, podendo acarretar: produtos fora de especificação; sobrecarga no circuito de britagem (à montante); aumento do desgaste dos revestimentos; menor capacidade do britador e aumento da potência consumida; e aumento da carga circulante.

A Figura 33 mostra a tela de operação da unidade de peneiramento secundário de uma dada companhia mineradora de ferro. Na tela são representadas ao todo sete linhas de peneiramento compostas por um silo de alimentação; um alimentador em esteira; uma peneira classificadora; uma dupla de peneiras desbastadoras; um classificador espiral; e uma peneira desaguadora. O produto gerado nesta etapa do processo é o Sinter Feed, representado pelo *overflow* das peneiras.



Figura 33 – Tela de operação do Peneiramento Secundário

5.2.2 Descrição do problema

A operação original da unidade de peneiramento secundário da companhia em questão prevê a definição de setpoints fixos de alimentação para cada linha. Tais setpoints de alimentação só são alterados com a intervenção manual da operação no sistema de controle.

Em vários momentos, variações na característica do material que vem dos processos a montante fazem com que a taxa de alimentação da linha fique incompatível com as condições de carga das peneiras. Em outras palavras, dependendo da característica do material, a taxa de alimentação estipulada por linha pode vir a gerar sobrecarga nas peneiras e, conseqüentemente, paradas de produção nas linhas afetadas. Esse efeito é predominante nas peneiras desbastadoras (2º nível de classificação).

Como a incidência de sobrecarga nas peneiras desbastadoras ocorre com freqüência, pensou-se em um projeto de automação que tornasse possível a regulação automática da taxa de alimentação das linhas em função das condições de carga das peneiras. O escopo da proposta de projeto é descrito no próximo item.

5.2.3 Escopo do projeto

Tabela 12 – Informações do projeto

Título do Projeto	Implementação de controle automático de alimentação nas linhas de peneiramento secundário
Justificativa	Atualmente os setpoints de alimentação são fixos, gerando paradas por sobrecarga e perdas de produção em função de variações nas características do minério alimentado
Objetivo	Regular a alimentação das linhas respeitando as condições de carga das peneiras e evitando ocorrências de paradas por sobrecarga
Metodologia	<ul style="list-style-type: none"> - Levantamento de dados - Testes e modelagem do comportamento da corrente das peneiras desbastadoras em função da taxa de alimentação de minério da linha - Implementação de controle PID para regular a taxa de alimentação de acordo com a corrente - Start-up 1ª linha - Operação Assistida - Replicar controle para as demais linhas do peneiramento secundário
Áreas físicas envolvidas	Usina/Unidade de Beneficiamento/Operação Unitária de Peneiramento Secundário/Linhas 1 a 14
Atuação do projeto	Controle e supervisão
Variável(is) de negócio impactada(s)	Disponibilidade Física de Equipamentos; Volume de Produção;
Variáveis de processo impactadas	Nível dos silos de alimentação; Vazão de alimentação por linha; Corrente das peneiras desbastadoras;
Evento(s) discreto(s)	Paradas de equipamentos; Ocorrências de sobrecarga
Prazo	3 meses
Orçamento	100.000,00 u.m. (unidades monetárias)
Custos Operacionais Incorridos	0,00 u.m. (justificativa: a implantação do projeto pode ser realizada com a planta em funcionamento)

5.2.4 Estimação de ganhos do projeto

5.2.4.1 Passo 1 – Entendimento do escopo do projeto

Para o entendimento do escopo do projeto são levantadas as informações apresentadas na Tabela 12.

5.2.4.2 Passo 2 – Identificação dos direcionadores de negócio impactados pelo projeto

Os direcionadores de negócio impactados pelo projeto são:

- Disponibilidade Física (DF) – indicador percentual que mede qual a parcela de tempo que um determinado equipamento/unidade/planta esteve disponível para operar, ou seja, livre de falhas ou manutenção. Por exemplo, uma DF diária de 75% indica que o equipamento esteve disponível em 18 das 24 horas totais do dia. Da mesma forma, uma DF mensal de 75% indica que o equipamento (ou a unidade) esteve disponível 540 das 720 horas totais decorridas no mês;
- Volume de Produção – indicador que mede o volume de produção de um determinado equipamento/unidade/planta dentro de um dado período de tempo. No caso do processo em questão, tal indicador é medido em toneladas produzidas.

5.2.4.3 Passo 3 – Identificar as variáveis de processo que têm influência sobre os direcionadores de negócio

As variáveis de processo do Peneiramento Secundário que têm influência sobre os direcionadores de negócio apontados são:

- Vazão de alimentação das linhas de peneiramento (t/h);
- Corrente das peneiras desbastadoras (A);
- Nível dos silos de alimentação das linhas de peneiramento (m);

Dentre essas variáveis, as duas primeiras sofrem impacto do escopo do projeto.

5.2.4.4 Passo 4 – Levantamento de dados

A empresa em questão possui um sistema automático de registro de paradas e apontamento de causas. Este sistema permite consultas aos dados e geração de relatórios com informações consolidadas. A Figura 34 mostra um trecho de uma planilha gerada a

partir dos dados do sistema. A planilha contém informações filtradas pela área de atuação (Peneiramento Secundário). As principais informações disponíveis sobre as paradas são: natureza; equipamento; causa; efeito; data e duração.

1	Ordem	Resp.	Natureza	Equipamento	Efeito	Causa	Data	Horas	Area
3	2	GANEN	MECA	PN 131-96	Sump obstruído.	Tubulação obstruída.	1/8/2005	1,654166667	PEN II
5	4	GANEN	OPER	PN 131-17	Sump obstruído.	Acúmulo de material	1/8/2005	0,645833333	PEN II
12	11	GAUAN	MECA	PN 131-35	Bomba obstruída.	Tela solta	1/8/2005	0,129166667	PEN II
13	12		MINA	AL 131-14	Falta de minério	Falta de equip. carregamento	1/8/2005	0,086458333	PEN II
14	13		MINA	AL 131-01	Falta de minério	Falta de equip. carregamento	1/8/2005	0,0125	PEN II
15	14		MINA	AL 131-13	Falta de minério	Falta de equip. carregamento	1/8/2005	0,082291667	PEN II
16	15		MINA	AL 131-06	Falta de minério	Falta de equip. carregamento	1/8/2005	0,0375	PEN II
18	17		MINA	AL 131-11	Falta de minério	Falta de equip. carregamento	1/8/2005	0,067708333	PEN II
20	19		MINA	AL 131-03	Falta de minério	Falta de equip. carregamento	1/8/2005	0,00625	PEN II
22	21		MINA	AL 131-07	Falta de minério	Falta de equip. carregamento	1/8/2005	0,03125	PEN II
27	26	GAUAN	MECA	PN 131-39	Bomba obstruída.	Estrutura danificada.	1/8/2005	0,197916667	PEN II
32	31	GATAN	OPER	BA 131-35	Sobrecarga de material	Acúmulo de material	1/8/2005	0,035416667	PEN II
51	50		MINA	AL 131-12	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,120833333	PEN II
52	51	GAUAN	MECA	PN 131-10	Manutenção .	Vazamento	1/8/2005	0,005208333	PEN II
53	52		MINA	AL 131-11	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,039583333	PEN II
54	53		MINA	AL 131-12	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,032291667	PEN II
55	54		MINA	AL 131-12	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,0125	PEN II
56	55	GAUAN	MECA	PN 131-01	Manutenção .	Vazamento	1/8/2005	0,04375	PEN II
57	56		MINA	AL 131-08	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,14375	PEN II
58	57		MINA	AL 131-01	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,01875	PEN II
59	58		MINA	AL 131-05	Falta de minério	Falta de equip. carregamento	1/8/2005	0,009375	PEN II
61	60	GAUAN	MECA	CS 131-01	Manutenção .	Correia danificada	1/8/2005	0,252083333	PEN II
67	66		MINA	AL 131-09	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,027083333	PEN II
68	67		MINA	AL 131-10	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,009375	PEN II
69	68	GATAN	OPER	PN 131-66	Sump obstruído.	Acúmulo de material	1/8/2005	0,009375	PEN II
70	69		MINA	AL 131-11	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,00625	PEN II
71	70		MINA	AL 131-04	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,00625	PEN II
72	71		MINA	AL 131-11	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,021875	PEN II
73	72		MINA	AL 131-02	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,009375	PEN II
74	73		MINA	AL 131-03	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,009375	PEN II
75	74		MINA	AL 131-14	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,125	PEN II
76	75		MINA	AL 131-06	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,019791667	PEN II
77	76		MINA	AL 131-05	Falta de minério	Falta de frente	1/8/2005	0,017708333	PEN II
82	81	GATUN	MECA	PN 131-07	Contaminação 1º deck.	Tela Solta (1º deck)	1/8/2005	0,445833333	PEN II
83	82	GATAN	OPER	PN 131-66	Sobrecarga de motor	Sobrecarga de material	1/8/2005	0,012541667	PEN II

Figura 34 – Exemplo de planilha para registro de paradas de equipamentos

5.2.4.5 Passo 5 – Estimação do ganho potencial

Pela descrição do problema, fica evidente que deve ser utilizada a análise baseada em eventos discretos para estimar o ganho potencial do projeto. Nesse caso, os eventos discretos são representados pelas paradas de produção do Peneiramento Secundário.

De um total de 285⁷ causas de paradas distintas catalogadas no sistema para a área do Peneiramento Secundário, uma análise mais detalhada (incluindo entrevistas com a equipe de operação e manutenção) aponta que as seguintes causas podem ser influenciadas pelo projeto (i. e. causas evitáveis):

- Sobrecarga de Material
- Sobrecarga no Motor

⁷ Importante ressaltar que dessas 285 causas possíveis, as 40 mais relevantes já respondiam por 80% das horas paradas. Como é de costume nos Paretos pela regra 80/20.

- Tela Danificada

A Tabela 13 associa as causas de paradas “evitáveis” ao grau de impacto do projeto estabelecido para as mesmas. A coluna “Justificativa” descreve de forma breve o critério utilizado para definição deste grau de impacto.

Tabela 13 – Grau de impacto das causas de parada de equipamento

Causas Evitáveis	Influência do Projeto	Grau de Impacto	Justificativa
Sobrecarga de Material	Alta	75%	O controle de alimentação, na maioria das ocasiões, impedirá que a corrente das peneiras ultrapasse o limite de sobrecarga
Sobrecarga no Motor	Alta	75%	O controle de alimentação, na maioria das ocasiões, impedirá que a corrente das peneiras ultrapasse o limite de sobrecarga. Em alguns casos, a variação na corrente será muito brusca impedindo a ação do controlador.
Tela Danificada	Baixa	5%	Existem diversos outros fatores além da sobrecarga de material que contribuem para o desgaste e perfuração das telas das peneiras. Por exemplo: granulometria do material e presença de corpos estranhos.

A unidade de Peneiramento Secundário em estudo possui uma capacidade produtiva de 14400 t/h. Em um ano, as paradas ocorridas na unidade devido às causas evitáveis selecionadas somaram 170 horas, sendo 163,9 por “Tela Danificada”; 2,9 por “Sobrecarga de Material”; e 3,0 por “Sobrecarga no Motor”.

A Tabela 14 apresenta o racional para cálculo do ganho potencial do projeto. Tal ganho decorre da redução de ocorrência de paradas e conseqüente aumento no volume de produção.

Antes de se traduzir em valores monetários o ganho potencial encontrado um fato importante deve ser considerado: o Peneiramento Secundário é um processo intermediário do beneficiamento mineral. Isso significa dizer que nem todo material processado por esta unidade se tornará produto comercializável no final da cadeia. Parte do material recebido pelo Peneiramento Secundário será classificado como rejeito de produção.

Tabela 14 – Cálculo do ganho potencial

Causas Evitáveis	Incidência do Evento (horas_paradas/ano)	Grau de Impacto	Taxa Nominal de Produção (t/h)	Ganho Potencial em Volume de Produção (t/ano)
Sobrecarga de Material	2,9	75%	14400	= 2,9 x 75% x 14400 = 31320
Sobrecarga no Motor	3,0	75%	14400	= 3,0 x 75% x 14400 = 32400
Tela Danificada	163,9	5%	14400	= 163,9 x 5% x 14400 = 118008
TOTAL				= 181728 t/ano

Em mineração, o indicador que mede qual parcela de material bruto processado por uma determinada unidade se torna efetivamente produto comercializável é denominado Rendimento em Massa. Na planta objeto deste estudo de caso, o Rendimento em Massa do Peneiramento Secundário, que é sempre um dado conhecido da Engenharia de Processos, é de aproximadamente 88% (Figura 35).

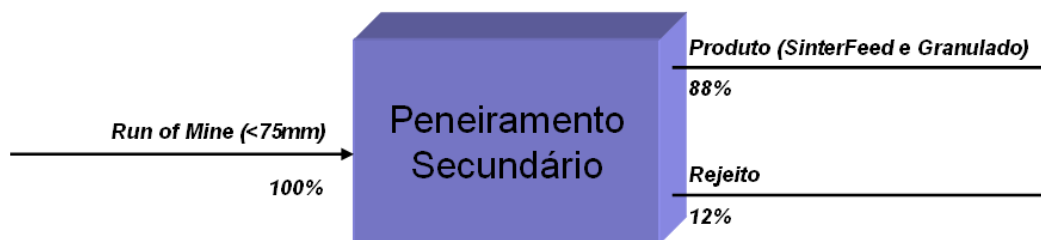


Figura 35 – Representação do balanço de massa do Peneiramento Secundário

Sendo assim, supondo-se uma margem líquida média de 15 unidades monetárias (u.m.) para os produtos comercializáveis do Peneiramento Secundário, o cálculo que se faz para estimar o ganho em valores financeiros é:

$$\begin{aligned} \text{Ganho_Potencial (u.m./ano)} &= \text{Ganho_Potencial (t/ano)} \times \text{Rend_Massa} \times \text{Margem_Líquida} \\ \text{Ganho_Potencial (u.m./ano)} &= 181728 \times 88\% \times 15 \\ \text{Ganho_Potencial} &\cong \mathbf{2.400.000,00 \text{ u.m./ano}} \end{aligned}$$

Em termos de Disponibilidade Física, com a redução de paradas prevista pela implantação do projeto, este indicador passaria de 71,1% para **71,2%**, tomando-se como base os mesmos dados históricos.

5.2.4.6 Passo 6 – Análise de viabilidade financeira do empreendimento

Neste estudo de caso específico, a análise de viabilidade financeira é praticamente dispensável uma vez que o ganho potencial (2.400.000,00 u.m./ano) é muito superior ao investimento do projeto (100.000,00 u.m.) e a viabilidade é evidente. Entretanto, para efeito de ilustração, será feita a análise formal utilizando todos os métodos propostos em 4.6.

Método do Valor Presente

Assumindo-se uma taxa de desconto de 10% a.a., tem-se:

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^n} = \frac{2400000,00}{(1+0,1)^1} = 2376237,60 \text{ u.m.} \quad \text{Equação 5-24}$$

Método do Valor Presente Líquido

Mais uma vez, para utilizar o método do VPL, será distribuído o ganho potencial calculado com base anual nos meses subseqüentes ao projeto. Também aqui é razoável assumir uma distribuição homogênea ao longo dos meses uma vez que a ocorrência dos eventos operacionais que são alvo do projeto não sofrem nenhum tipo de influência sazonal.

A Tabela 15 apresenta a memória de cálculo do VPL para o projeto assumindo uma taxa de desconto de 0,8% a.m.

Tabela 15 – Cálculo do VPL

	Fluxo de Caixa	VP
Mês 1	-40.000	= -40.000
Mês 2	-30.000	$= \frac{-30.000}{(1+0,008)^1} = -29.762$
Mês 3	-30.000	$= \frac{-30.000}{(1+0,008)^2} = -29.526$
Mês 4	+200.000	$= \frac{200.000}{(1+0,008)^3} = 195.276$
Mês 5	+200.000	$= \frac{200.000}{(1+0,008)^4} = 193.726$
Mês 6	+200.000	= 192.188
Mês 7	+200.000	= 190.663
Mês 8	+200.000	= 189.150
Mês 9	+200.000	= 187.649
Mês 10	+200.000	= 186.160
Mês 11	+200.000	= 184.682
Mês 12	+200.000	= 183.216
Mês 13	+200.000	= 181.762
Mês 14	+200.000	= 180.320
Mês 15	+200.000	= 178.889
	VPL	= 2.144.393

Taxa Interna de Retorno (TIR).

A Figura 36 apresenta o cálculo da TIR para o presente estudo de caso utilizando o Microsoft Excel.

A empresa em questão opera com uma taxa de atratividade de 12% a.a. Sendo assim, o valor da TIR obtido de 88% a.m. torna o empreendimento atrativo e viável do ponto de vista financeiro para tal companhia.

Período	Fluxo de Caixa (u.m.)	Descrição
Mês 1	-40000	Orçamento do 1o mês de implantação do projeto
Mês 2	-30000	Orçamento do 2o mês de implantação do projeto
Mês 3	-30000	Orçamento do 3o mês de implantação do projeto
Mês 4	200000	A receita líquida do 1o mês após a conclusão do projeto
Mês 5	200000	A receita líquida do 2o mês após a conclusão do projeto
Mês 6	200000	A receita líquida do 3o mês após a conclusão do projeto
Mês 7	200000	A receita líquida do 4o mês após a conclusão do projeto
Mês 8	200000	A receita líquida do 5o mês após a conclusão do projeto
Mês 9	200000	A receita líquida do 6o mês após a conclusão do projeto
Mês 10	200000	A receita líquida do 7o mês após a conclusão do projeto
Mês 11	200000	A receita líquida do 8o mês após a conclusão do projeto
Mês 12	200000	A receita líquida do 9o mês após a conclusão do projeto
Mês 13	200000	A receita líquida do 10o mês após a conclusão do projeto
Mês 14	200000	A receita líquida do 11o mês após a conclusão do projeto
Mês 15	200000	A receita líquida do 12o mês após a conclusão do projeto
TIR	88%	a.m.

Figura 36 – Exemplo de planilha eletrônica para cálculo da Taxa Interna de Retorno

Retorno contábil sobre o investimento (ROI)

O retorno contábil sobre o investimento é a relação entre o lucro líquido e o custo total do investimento. Para este estudo de caso tem-se:

$$ROI(\%) = \frac{\text{Receita} - \text{Custo}}{\text{Custo}} = \frac{\text{Receita}}{\text{Custo}} - 1 \quad \text{Equação 5-25}$$

$$ROI(\%) = \frac{2400000,00}{100000,00} - 1 = 2300\% \quad \text{Equação 5-26}$$

Período de *payback* do investimento

Para calcular o *payback* basta dividir o custo total do investimento pelos retornos periódicos esperados com o projeto.

$$\text{Payback}(em_meses) = \frac{\text{Custo_Investimento}}{\text{Receita_por_mês}} \quad \text{Equação 5-27}$$

$$\text{Payback}(em_meses) = \frac{100000,00}{2400000,00} = 0,4 \quad \text{Equação 5-28}$$

Ou seja, o projeto se pagaria antes da metade do primeiro mês após a sua implementação.

5.3 Estudo de Caso #3 – Implementação de um Novo Sistema de Controle e Automação de Aperto Mecânico em Conexões de Tubos Petrolíferos

5.3.1 Introdução

Como já foi mencionado, este estudo de caso difere dos demais. Aqui, o objetivo não é estimar o ganho potencial de um determinado empreendimento futuro e sim, medir o ganho obtido com uma ação de melhoria já implementada.

A implementação em questão foi desenvolvida por Costa (2009) que gentilmente cedeu os dados e registros históricos de processo para que pudesse ser realizada a medição dos ganhos correspondentes.

Opta-se por ilustrar este tipo de aplicação por serem comuns as iniciativas de projetos que não necessariamente passam por uma fase conceitual ou análise de viabilidade. Isso acontece principalmente com projetos de menor porte e que, na maioria dos casos, envolvem apenas recursos internos à companhia.

Para análises como esta não há sentido em aplicar integralmente a proposta metodológica do Capítulo 4. Ver-se-á por meio do estudo de caso que as particularidades da análise dão a noção de quais conceitos e técnicas da metodologia devem ser empregadas.

5.3.2 Escopo do projeto

Tabela 16 – Informações do projeto

Título do Projeto	Implementação de um Novo Sistema de Controle e Automação de Aperto Mecânico em Conexões de Tubos Petrolíferos
Justificativa	Dentre as etapas do processo de produção de tubos petrolíferos, garantir a qualidade do processo de aperto mecânico é de vital importância, pois é por meio de um aperto adequado que se garante o bom comportamento da conexão entre tubos durante sua aplicação no campo.
Objetivo	Redução da variabilidade do valor final de torque de aperto mecânico em conexões de tubos petrolíferos
Metodologia	Para viabilizar a implementação da solução completa, foi necessária a divisão do projeto em etapas. A primeira etapa consistiu no desenvolvimento e substituição do software de operação e a última etapa consistiu na otimização do controle de processo por meio de um sistema nebuloso. Dentre as etapas intermediárias, destaca-se o desenvolvimento do software do novo controlador lógico programável, a substituição do controlador lógico programável e o desenvolvimento e implantação do servidor de relatórios WEB (Costa, 2009).
Áreas físicas envolvidas	Máquina de apertar luvas
Níveis de atuação do projeto	Controle e supervisão
Variável(is) de negócio impactada(s)	Probabilidade de Ocorrência de Apertos Não-Conformes (%);
Variáveis de processo impactadas	Torque de aperto (Nm);
Evento(s) operacional(is) discreto(s) impactado(s)	Ocorrências de re-aperto
Prazo	Não informado
Orçamento	Não informado
Custos Operacionais Incorridos	Não informado

5.3.3 Medição de ganhos do projeto

Para a medição de ganhos, utiliza-se os resultados de 335 apertos válidos realizados em uma dada campanha de produção, dos quais 214 apertos válidos foram realizados antes da otimização do controle de processo e 121 apertos válidos foram realizados após a otimização. As características desta campanha são as seguintes:

- Diâmetro do tubo: 114,3 mm.
- Grau do aço: L80.

- Parede: 6,88 mm.
- Rosca: VAM TOP.
- Torque nominal: 6600 Nm.
- Torque mínimo: 4300 Nm.
- Torque máximo: 7600 Nm.
- Número de total de apertos antes da otimização: 240.
- Número total de apertos após a otimização: 128.

Materiais com estas características ou semelhantes são comumente fabricados na linha de produção de tubos petrolíferos.

A melhoria obtida no controle do torque pode ser quantificada analisando-se o cenário ANTES x DEPOIS sob duas óticas distintas. São elas:

- Redução da probabilidade de ocorrência de apertos não-conformes;
- Deslocamento de média para maior aproximação ao torque ótimo.

Em ambos os casos, o indicador chave que permite mensurar o ganho é a redução evidenciada no desvio padrão amostral dos dados de torque.

Tal comparação ANTES x DEPOIS apresenta os seguintes valores (depois de eliminados os outliers):

Tabela 17 – Comparativo “Antes x Depois” do torque de aperto

	ANTES	DEPOIS
Média das amostras	5918	5854
Desvio Padrão Amostral	374	212

O gráfico da Figura 37 apresenta o torque atingido em cada aperto antes e após a otimização do controle de processo. As linhas horizontais representam as referências mínima, nominal e máxima de torque. Analisando o gráfico, observa-se uma dispersão em relação à média, a qual é claramente maior antes da otimização.

A Figura 38 apresenta os dados coletados antes da otimização do controle do processo em forma de histograma juntamente com sua curva de distribuição normal. Observa-se que a curva normal abrange uma faixa de aproximadamente 2000 Nm.

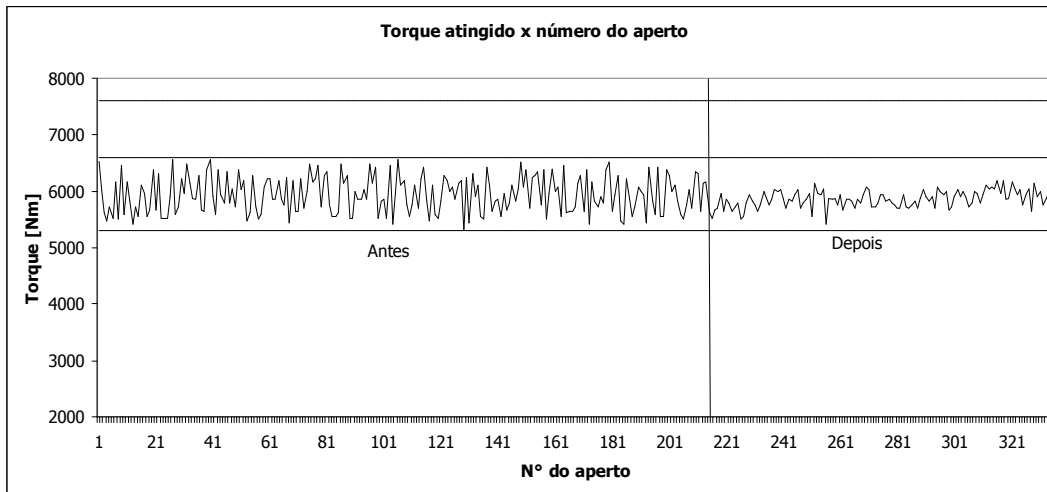


Figura 37 – Gráfico de tendência do torque de aperto

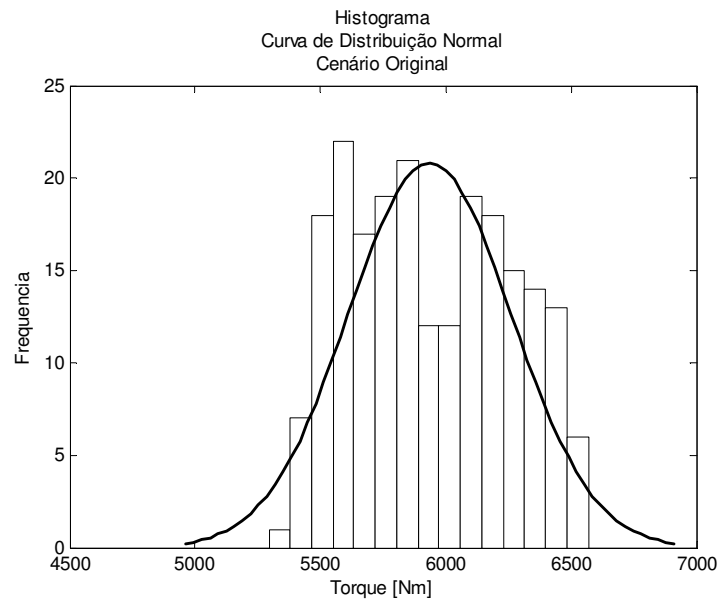


Figura 38 – Histograma do torque de aperto - ANTES

A Figura 39 apresenta os dados coletados após a otimização do controle do processo em forma de histograma juntamente com sua curva de distribuição normal. Observa-se que a largura da curva normal reduziu pela metade, indicando redução de variabilidade de torque atingido.

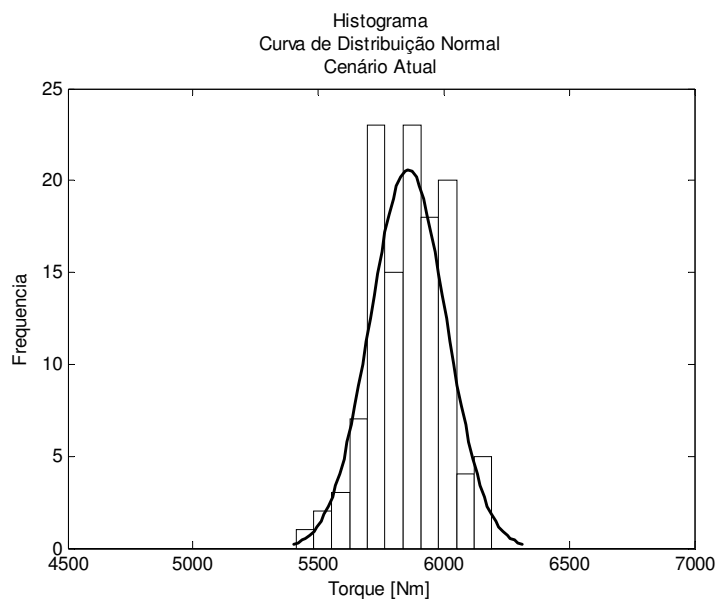


Figura 39 – Histograma do torque de aperto - DEPOIS

5.3.3.1 Abordagem 1 - Redução da probabilidade de ocorrência de apertos não-conformes

A redução no desvio padrão amostral do torque depois da implementação da melhoria evidencia um “estreitamento” da curva de distribuição normal aproximada para o processo quando se compara o cenário antes x depois.

Naturalmente, isso implica em uma diminuição na probabilidade de o torque ultrapassar o valor máximo permitido (7600), ou ficar abaixo do valor mínimo permitido (5300).

O cálculo dessa diminuição de probabilidade é feito pela subtração das distribuições normais acumuladas de ambos os cenários (antes e depois). Este cálculo é simples e pode ser referenciado na grande maioria dos livros de controle estatístico encontrados na literatura, como por exemplo em Montgomery (2004).

Em linhas gerais, a distribuição normal acumulada é obtida calculando-se a probabilidade de X ser menor que um dado valor x:

$$P(X \leq x) = F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad \text{Equação 5-29}$$

A solução está apresentada em tabelas da distribuição normal padronizada onde se entra com a variável reduzida Z (número de desvios-padrões distantes da média) e encontra-se F(Z) ou vice-versa.

$$P\{X \leq x\} = P\left\{Z \leq \frac{x - \mu}{\sigma}\right\} = F(Z) \Rightarrow \text{Tabelado} \quad \text{Equação 5-30}$$

Para saber o valor da probabilidade, utiliza-se a tabela da distribuição normal. Essa tabela fornece a área acumulada até o valor de Z. Exemplo:

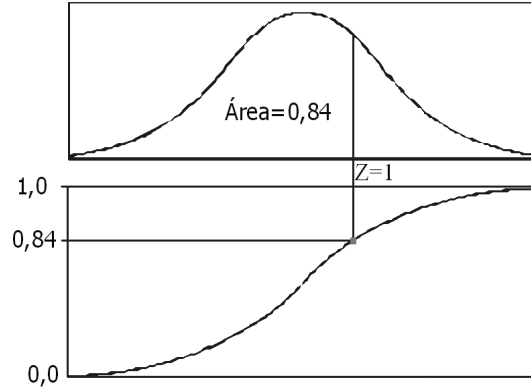


Figura 40 – Exemplo de variável reduzida Z

A Tabela 18 mostra os resultados da análise para o caso em estudo:

Tabela 18 – Análise de probabilidade de rejeição

	ANTES	DEPOIS
Z inf	$(5300 - 5918)/374 = -1,65$	$(5300 - 5854)/212 = -2,61$
P(Torque \leq 5300)	4,95% (tabelado)	0,45% (tabelado)
Z sup	$(7600 - 5918)/374 = 4,49$	$(7600 - 5854)/212 = 8,22$
1 - P(Torque \leq 7600)	1-1,00 = 0% (tabelado)	1-1,00 = 0% (tabelado)

Ou seja, a probabilidade do torque não alcançar o limite mínimo de 5300 que antes era de 4,95% caiu para **0,45%** (**1 aperto rejeitado a cada 220 aceitos**).

Já a probabilidade de exceder o limite máximo manteve-se a mesma uma vez que já era praticamente nula antes da implementação da melhoria.

5.3.3.2 Abordagem 2 - Deslocamento de média para maior aproximação ao torque ótimo

Nesta análise, o “estreitamento” da curva de distribuição normal aproximada evidenciado pela melhoria remete a uma outra possibilidade: a possibilidade de se deslocar o ponto operacional do processo de forma a se aproximar cada vez mais o torque médio ao torque ótimo (6600).

A equação que permite calcular este deslocamento de ponto operacional é a Equação 4-9 apresentada na seção 4.5.1.1.1.

Como já fora mencionado, o ponto chave para a utilização desta equação é a determinação de X_L , a restrição do processo. Tal determinação pode ser feita de forma

teórica, combinando-se as restrições dos equipamentos envolvidos no processo e encontrando-se o valor de torque máximo possível de ser obtido com a base instalada; ou empiricamente, utilizando valores históricos do processo e aplicando o critério da igual violação (4.5.1.1.1).

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para o caso em análise utilizando o critério de igual violação, com X_L sendo representado pelo Percentil95 das amostras históricas.

Tabela 19 – Cálculo do deslocamento de média

Scap	212
Stot	374
X_L	6510
X_{old}	5918
ΔX	256
X_{new}	6174

Em resumo, o resultado mostra que, após as melhorias implementadas e a conseqüente redução na variabilidade do processo, existe margem para que o torque médio do processo seja deslocado de 5918 para 6174 sem, no entanto, comprometer a integridade dos equipamentos envolvidos. Isso representaria um **aumento de 4,3% no torque médio do processo.**

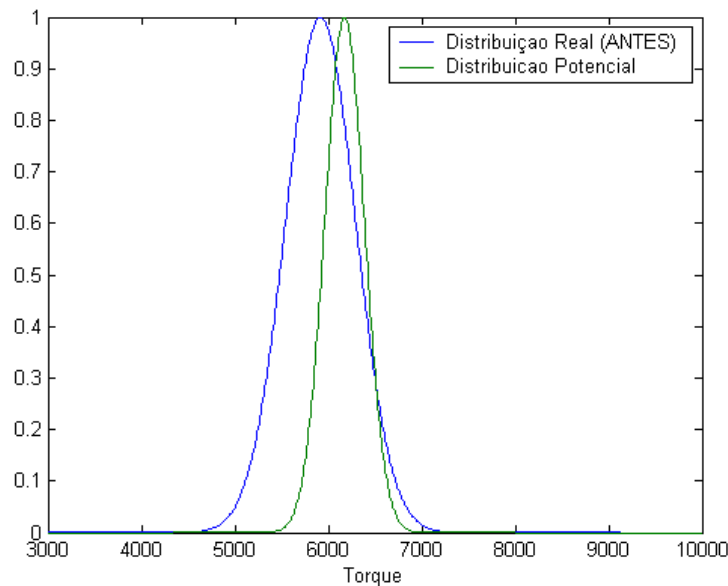


Figura 41 – Deslocamento da média do torque de aperto

5.3.3.3 Análise de Retorno Econômico

De posse das análises realizadas nas abordagens 1 e 2 (seções 5.3.3.1 e 5.3.3.2), o próximo passo é converter os resultados em ganhos financeiros.

Para a abordagem #1, esta conversão pode ser feita considerando-se que cada peça rejeitada devido a torque baixo durante o aperto tem associada a ela um custo operacional. Sendo assim, ao se reduzir a probabilidade de ocorrência de apertos rejeitados reduz-se de forma proporcional o custo operacional associado a tais rejeições.

No caso em estudo, a probabilidade saiu de 11 peças rejeitadas a cada 220 processadas para 1 peça rejeitada a cada 220 processadas. Isso significa uma redução de probabilidade de aproximadamente 91% e, naturalmente, uma redução de igual valor no custo operacional associado a tal desvio.

Já para a abordagem #2, a análise de retorno econômico acaba sendo um pouco mais subjetiva. Isso porque a conversão deve levar em conta qual a vantagem econômica de se produzir mais próximo do torque ótimo. Se tal vantagem econômica for mensurável (por exemplo: o valor econômico da peça ser proporcional à sua qualidade de torque), para saber o ganho basta multiplicar o valor econômico da peça pela quantidade de peças produzidas com a nova média de torque e subtrair o resultado pela mesma multiplicação considerando a média de torque anterior. A Equação 5-31 ilustra este raciocínio.

$$\text{Retorno_Economico(R\$)} = \text{no_peças} \times \left(R\$ / \text{peças}_{\text{torque_alto}} - R\$ / \text{peças}_{\text{torque_baixo}} \right) \quad \text{Equação 5-31}$$

Por outro lado, se tal vantagem econômica não for mensurável (por exemplo: vantagem competitiva na obtenção de novos contratos) a análise de retorno econômico acaba extrapolando o ambiente da engenharia e tendo que ser realizada pelo nível mais estratégico da companhia.

5.4 Comentários Finais

Com os estudos de caso selecionados procurou-se mostrar não só a aplicabilidade da metodologia como também a sua abrangência. Isso porque os três estudos de caso representam cenários distintos tanto no que diz respeito à vertical de negócio (siderurgia e mineração) quanto ao tipo de benefício almejado.

No estudo de caso #1 foi empregada a análise baseada no comportamento estatístico para se estimar o ganho potencial do projeto enquanto no estudo de caso #2 foi utilizada a análise baseada em eventos discretos. Já o estudo de caso #3 difere dos demais pelo fato de não ser uma tarefa de estimação de ganhos e sim de medição dos ganhos pós-projeto.

Finalmente, em todos os três casos procurou-se deixar explícito o cumprimento dos fatores fundamentais de sucesso de aplicação da metodologia, deixando claro o entendimento do projeto e seus objetivos, o entendimento do problema a ser resolvido e apresentando amostras dos dados que foram disponibilizados para a análise.

6 CONCLUSÕES

A proposta de uma metodologia para estimação de ganhos financeiros em projetos de automação e controle foi apresentada. Procurou-se agrupar conceitos já solidificados na literatura com outras boas práticas advindas de relatos e publicações na área. A metodologia é composta de seis passos principais e foi concebida para integrar a etapa inicial do ciclo de vida de um projeto – etapa de análise de viabilidade. A proposta metodológica tem o intuito de ser de fácil aplicação prática e de oferecer resultados compatíveis com o nível de incerteza aceitável nesta etapa inicial do empreendimento.

O ponto de partida do processo de estimação de ganhos é um bom entendimento do projeto – neste contexto, a lista de questões apresentadas na seção 4.1 ajuda a levantar as informações indispensáveis para garantir tal entendimento – e do que ele se propõe a transformar – o que é realizado estabelecendo-se o elo entre as variáveis afetadas pelo projeto e os direcionadores de negócio da companhia (seção 3.1.1).

No passo seguinte, ou seja, na coleta de dados históricos referentes a tais indicadores e variáveis, as recomendações principais ficam por conta da confiabilidade dos dados, frequência de amostragem e horizonte de análise. Em linhas gerais, as orientações passadas na seção 4.4 indicam que deve-se procurar uma fonte confiável de dados (de preferência as fontes oficiais utilizadas pela alta gestão) e que todo e qualquer evento operacional relevante seja conhecido de forma que a análise não fique distorcida por uma situação de excessão ou fora de regime.

Seguindo adiante na estimativa do ganho potencial do projeto (seção 4.5), uma importante tarefa é a de escolher a melhor alternativa de cálculo, começando pela abordagem macro. Se o projeto tem como objetivo melhorar o comportamento estatístico da(s) variável(is) de interesse (ex.: aumentar produtividade, reduzir variabilidade do produto, reduzir consumo específico global, etc.) deve-se optar pela análise baseada em comportamento estatístico. Por outro lado, se o projeto tem a finalidade de promover/reduzir certos eventos operacionais desejados/indesejados (ex.: redução de paradas de equipamentos, aumento da ocorrência de produtos conformes, etc.) deve-se optar pela análise baseada em eventos discretos.

Uma das principais contribuições do trabalho está nas técnicas apresentadas para análise de sensibilidade (4.5.1.2 e 4.5.2.3). Isso porque, na maioria das vezes o desafio não está em identificar o potencial de melhoria que existe em um processo ou operação

e sim qual parcela deste potencial é capturável pelas ações que planeja-se executar. Muitas vezes boa parte dos ganhos está associada a grandes transformações e que podem não ser foco em um determinado momento, como por exemplo a substituição de equipamentos, o repotenciamento de uma linha, a alteração completa da configuração mecânica do processo, entre outros. Saber o que se consegue ganhar com as ações de pequeno/médio porte é fundamental nestes casos.

Para se medir a sensibilidade dos direcionadores de negócio às variáveis afetadas pelo projeto são propostas quatro alternativas para a análise baseada no comportamento estatístico (método da matriz de variabilidade; método da correlação cruzada; método baseado em PLS; método baseado na opinião dos especialistas) e uma alternativa para a análise baseada em eventos discretos. Ainda assim, cada alternativa apresentada pode ou não ser adequada a determinados tipos de situação. Por exemplo, na proposição fica claro que, quando o problema envolve um número elevado de variáveis, o método da matriz de variabilidade não é o mais indicado, devendo-se optar por um dos outros três métodos. Da mesma forma, quando o problema envolve atrasos muito grandes entre a variável de processo e seus desdobramentos na variável de negócio, a aplicação dos métodos de correlação cruzada e PLS deve ser feita com critério. Quanto maior a exatidão na identificação deste tempo de atraso, mais confiáveis serão os resultados obtidos.

Já no caso da análise baseada em eventos discretos, o cuidado que se deve tomar é no momento de estabelecer a escala de impacto. Uma boa prática, como discutido, é assumir uma escala crescente ao longo do processo produtivo (desde o recebimento da matéria prima até a entrega do produto final).

O último passo da metodologia é a análise de viabilidade financeira. Neste ponto, as técnicas apresentadas já estão consolidadas na literatura e de fácil aplicação quando se tem consigo os parâmetros do cálculo. Importante, no entanto, é escolher qual fórmula aplicar. Isso deve ser guiado pela forma como a liderança da companhia quer conduzir aquele investimento pois muitas vezes o foco está na velocidade do retorno, outras vezes está na taxa, outras no volume, e assim por diante.

Finalmente, os três estudos de caso apresentados ajudam a confirmar a aplicabilidade e abrangência da proposta metodológica, uma vez que representavam processos e projetos com características totalmente distintas e que, mesmo assim, puderam ser alvos de todos os passos do método.

6.1 Sugestões para continuidade

Conforme explorado em 4.7, há um grau de incerteza inerente do processo de estimação o qual pode ser apenas minimizado por meio da aplicação da metodologia, nunca eliminado.

Caso seja exigido um nível de exatidão muito elevado, uma saída segundo Friedmann (2006) é a de ser construir uma plataforma de simulação dinâmica do processo, aplicar as ações propostas a este simulador e medir os resultados. A simulação também seria a alternativa mais adequada quando o projeto se tratar da construção de uma nova planta ou unidade, situação onde não há registros de dados históricos e, muitas vezes, também não há *benchmarks*. Deve-se apenas ressaltar que a construção e operação de ambientes de simulação representa um esforço elevado, não facilmente justificável para alguns projetos.

Outras duas limitações do método e que abrem portas para trabalhos futuros são: 1) o fato de ele só ser aplicado a situações onde o projeto já é conhecido e 2) o fato de ser focado na estimativa a priori e não na medição efetiva do ganho pós-projeto. No primeiro caso, uma boa oportunidade de trabalho futuro seria a de adaptar a metodologia para que ela possa guiar novos investimentos. Ou seja, criar um método que seja capaz de identificar onde estão as maiores oportunidades de ganho em termos de controle e automação e com isso apoiar a equipe de planejamento na geração de especificações técnicas e RFPs sob medida. Algo semelhante ao que fora proposto por Hanley (1993). Em relação a segunda limitação, o Estudo de Caso #3 (5.3) já dá uma amostra do que pode ser feito. Ou seja, uma extensão do método incluindo passos a serem seguidos para medir os ganhos do projeto após implementado. Técnicas estatísticas de comparação do cenários antes/depois; medição on/off; dentre outras apresentadas na literatura (Marlin et al., 1987; Marlin et al., 1991; Marlin, 2000), poderiam ser propostas neste caso.

Finalmente, tem-se também como sugestão de continuidade do trabalho o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de automatizar os passos da proposta metodológica. Um software como este tornaria possível a utilização do método mesmo por profissionais com pouco conhecimento nas ferramentas estatísticas embarcadas, além de assegurar uma maior padronização e uniformidade em sua aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, H. Partial Least Square Regression. In: Neil Salkind (Ed.). Encyclopedia of Measurement and Statistics. Thousand Oaks, 2007.

AGUIRRE, L. A. Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000. 554 p.

BAUER, M.; CRAIG, I. K. Economic assessment of advanced process control - A survey and framework. *Journal of Process Control*, Pretoria, v. 18, p. 2-18, 2008.

BERTOLO, L. A. Um manual de estatística. Disponível em: http://www.bertolo.pro.br/AdminFin/StatFile/Manual_Estatistica.html . Acessado em: 22 de Mar. 2010.

COSTA, F. O. Implementação de um novo sistema de controle e automação de aperto mecânico em conexões de tubos petrolíferos. 2009. Monografia final do Curso de Especialização em Automação Industrial - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2009.

EMBIRUÇU, M. Estimativa de Benefícios em Projetos de Controle Automático de Processos (2004). Disponível em: < <http://www.lacoi.ufba.br/downloadsapostila.php>>. Acessado em: 18 de Fev. 2008.

FARENZENA, M.; TRIERWEILER, J. O. Variability Matrix: A new tool to improve the plant performance. In: ADCHEM - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED CONTROL OF CHEMICAL PROCESSES, Gramado, 2006.

FARENZENA, M.; FRAGA, M. F.; TRIERWEILER, J. O. Using the variability matrix to prioritize loops maintenance. In: WORKSHOP ON SOLVING INDUSTRIAL CONTROL AND OPTIMIZATION PROBLEMS, Gramado, 2006.

FRIEDMANN, P. G. Automation and control systems economics. 2. ed. North Carolina: ISA, 2006. 177p.

GUIMARÃES NETO, J. F. Mini-curso de controle avançado. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE AUTOMAÇÃO, SISTEMAS E INSTRUMENTAÇÃO, 10., São Paulo, 2006.

HANLEY, J. P. A strategic focus for process control. *ISA Transactions*, 32, 1, pp. 45-49, 1993.

HAYES, S. L. Finanças para gerentes. Tradução de Rytta Vinagre. Rio de Janeiro: Record, 2004. 251p.

INDEPENDENT PROJECT ANALYSIS. Individual Capital Project Services. Disponível em: <http://www.ipaglobal.com/Services/Individual-Capital-Project-Services> . Acessado em 20 de Mar. 2010.

- LATOUR, P. L., et al. Estimating benefits from advanced control. *ISA Transactions*, Vol. 25, No. 4, pp. 13-21, 1986.
- MARLIN, T. E., et al. Advanced process control applications. NC: Instrum. Society of America, Research Triangle Park, 1987.
- MARLIN, T. E., et al. Benefits from process control: results of a joint industry-university study. *Journal of Process Control*, 1, 57}83, 1991.
- MARLIN, T. E. Process Control: Designing Processes And Control Systems For Dynamic Performance. 2. ed. McGraw-Hill, 2000. 1017p.
- MARTIN, G. D., et al. Estimating control function benefits. *Hydrocarbon Processing*, pp. 68-73, 1991.
- MONTGOMERY, D. C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. Tradução de Ana Maria Lima de Farias e Vera Regina Lima de Farias e Flores. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 513p.
- PENTEC INDUSTRIAL. Peneiramento - Dados técnicos. Caeté, MG, 2004, 21 p.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). 3. ed. Pennsylvania, 2004.
- SANTIAGO, L. P. S. et al. Potencializando o planejamento de projetos: abordagem de uma metodologia de planejamento no contexto do padrão PMBOK. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., Rio de Janeiro, 2008.
- SEBORG, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A. Process Dynamics and Control. John Wiley & Sons, 1989.
- SHUNTA, J. P. Achieving world class manufacturing through process control. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 202p.
- TOBIAS, R.D. An Introduction to Partial Least Squares Regression, SAS Institute, 1999, pp. 1– 8.
- TORRES, B. S. Sintonia de controladores PID em um sistema multimalha. 2002. 192 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2002.
- TREVATHAN, V. L. A guide to the automation body of knowledge. 2ed. ISA, 2006. 506p.
- VALE. Relatório de Sustentabilidade 2007. Disponível em: http://www.vale.com/relatoriosustentabilidade2007/gestao_riscos.asp . Acessado em 20 de Mar. 2010.

WHITE, D. C. Calculating ROI for Automation Projects. Disponível em:
[http://www.emersonprocess.com/Solutions/services/aat/pub/Get the ROI RightR1_07024.pdf](http://www.emersonprocess.com/Solutions/services/aat/pub/Get_the_ROI_RightR1_07024.pdf) . Acesso em 20 de Mar. de 2010.