

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1 INTRODUÇÃO

A crise energética vivida no Brasil em 2001 alertou as empresas sobre a importância de se racionalizar o uso de energia elétrica. Desde o “apagão” daquele ano, várias iniciativas no sentido de economizar energia vêm sendo tomadas. A energia elétrica é vista no momento como um recurso escasso que, devido à discrepância entre os planos de investimento dos governos e nível de investimentos necessários apontados por especialistas, tende a se tornar cada vez mais escasso.

Tendo isto em vista, o objetivo deste trabalho é analisar e fornecer diretrizes para a redução do consumo de energia elétrica de uma empresa siderúrgica, cujo grupo de insumos principais inclui grande quantidade de energia elétrica.

1.2 RELAÇÃO ENTRE AUTOR E EMPRESAS

Este trabalho de formatura foi desenvolvido durante estágio na empresa Belge Engenharia. Devido à forma de atuação da empresa no mercado (representação de software e consultoria), o trabalho foi desenvolvido em uma das empresas clientes da Belge Engenharia: a V&M do Brasil, usina siderúrgica localizada em Belo Horizonte, MG. O departamento com o qual os contatos foram feitos foi a Gerência Energia e Utilidades, que é responsável, entre outras coisas, por prover energia elétrica à usina siderúrgica.

O trabalho foi desenvolvido como projeto piloto, oferecido à V&M do Brasil sem custo. Esta forma de condução do projeto permite que as três partes envolvidas no projeto ganhem: o autor tem à sua disposição o tema e informações para redigir seu trabalho de formatura; a V&M do Brasil recebe, sem custo, um estudo sobre a importante questão energética em seu processo produtivo; e a Belge Engenharia tem em seu portfólio mais um tipo de projeto para oferecer ao mercado. Isto é importante notadamente para a prospecção de novos clientes. Mais detalhes sobre as empresas envolvidas podem ser encontrados a seguir.

1.3 EMPRESAS ENVOLVIDAS NO ESTUDO

Como mencionado anteriormente, existem duas empresas envolvidas no projeto: a Belge Engenharia, onde o autor desenvolveu seu estágio, e a V&M do Brasil, empresa cliente da Belge Engenharia que foi objeto do estudo.

1.3.1 Belge Engenharia

A Belge Engenharia, originária da Siemens, é uma empresa especializada em fornecer produtos e serviços com alto conteúdo tecnológico no que diz respeito à tomada de decisões no campo da logística e nos setores industriais e de serviços. A empresa atua no mercado desde 1995.

A Belge Engenharia atua nos seguintes campos:

- Projetos de consultoria em produtividade industrial, planejamento logístico e otimização de processos;
- Fornecimento de softwares especiais – venda e suporte técnico de alto nível;
- Treinamento em técnicas inovadoras e nos produtos comercializados.

O principal parceiro tecnológico da Belge Engenharia é a PROMODEL CORPORATION – UTAH, EUA. Fundada em 1986, é líder mundial em sistemas para modelagem, simulação e otimização de processos. Com forte atuação no mercado internacional, possui ampla rede de distribuidores em todos os continentes e já vendeu mais de cinco mil cópias de seus softwares. Única empresa ‘Microsoft Solution Provider’ em seu segmento. A Belge Engenharia é distribuidora exclusiva da PROMODEL Corp. no Brasil.

Pode-se ver na figura a seguir alguns clientes da Belge Engenharia:



Figura 1.3.1.1 – Alguns clientes da Belge Engenharia no Brasil. Fonte: Material Institucional Belge (2003)

1.3.2 V&M do Brasil

A V&M do Brasil S.A. (ex-Mannesmann S.A.) foi fundada em 1952, a pedido do Governo Brasileiro para atender à necessidade de tubos de aço sem costura da emergente indústria petrolífera nacional, representada pela Petrobrás. A cidade de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, foi escolhida para sediar a empresa por possuir recursos abundantes de reservas de minério de ferro, além de reservas hídricas, como fonte de energia elétrica.

A Usina Siderúrgica Integrada do Barreiro, em Belo Horizonte, é o principal complexo industrial da V&M do Brasil (VMB), com uma área de quase 3 milhões de metros quadrados. A usina emprega cerca de quatro mil pessoas e produz, utilizando energia 100% renovável, aços de alta qualidade para tubos de aço sem costura. Com capacidade para produzir cerca de 450 mil toneladas de tubos por ano, esta unidade é uma das mais modernas e bem equipadas do mundo. Nela são produzidos tubos de

aço sem costura de até 14 polegadas, utilizando equipamentos eletro-eletrônicos de última geração.

No Brasil, os seus principais clientes estão nos setores de óleo e gás, automobilístico, indústria de base, indústria mecânica, distribuição de gás, caldeiras e trocadores de calor. Mundialmente, o produto é exportado para todos os países mas, principalmente, para a América Latina e América do Norte.

1.3.2.1 Produtos

A V&M do Brasil fabrica os seguintes produtos:

- Tubos Estruturais de Seções Circulares, Quadradas e Retangulares: utilizados para construção de estruturas na construção civil;
- Tubos Mecânicos: especiais para utilização na fabricação de máquinas e equipamentos;
- Tubos de Aço sem Costura para Caldeiras e Trocadores de Calor;
- Tubos Condutores: para gasodutos, plataformas de petróleo, etc.

1.4 PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo da VMB corresponde, em poucas palavras, a fundir minério de ferro nos altos fornos, trabalhar o material fundido quimicamente para que ele se transforme em aço e então trabalhar o aço para que se obtenham tubos. Este processo tem diversas etapas que podem ser visualizadas no fluxograma a seguir:

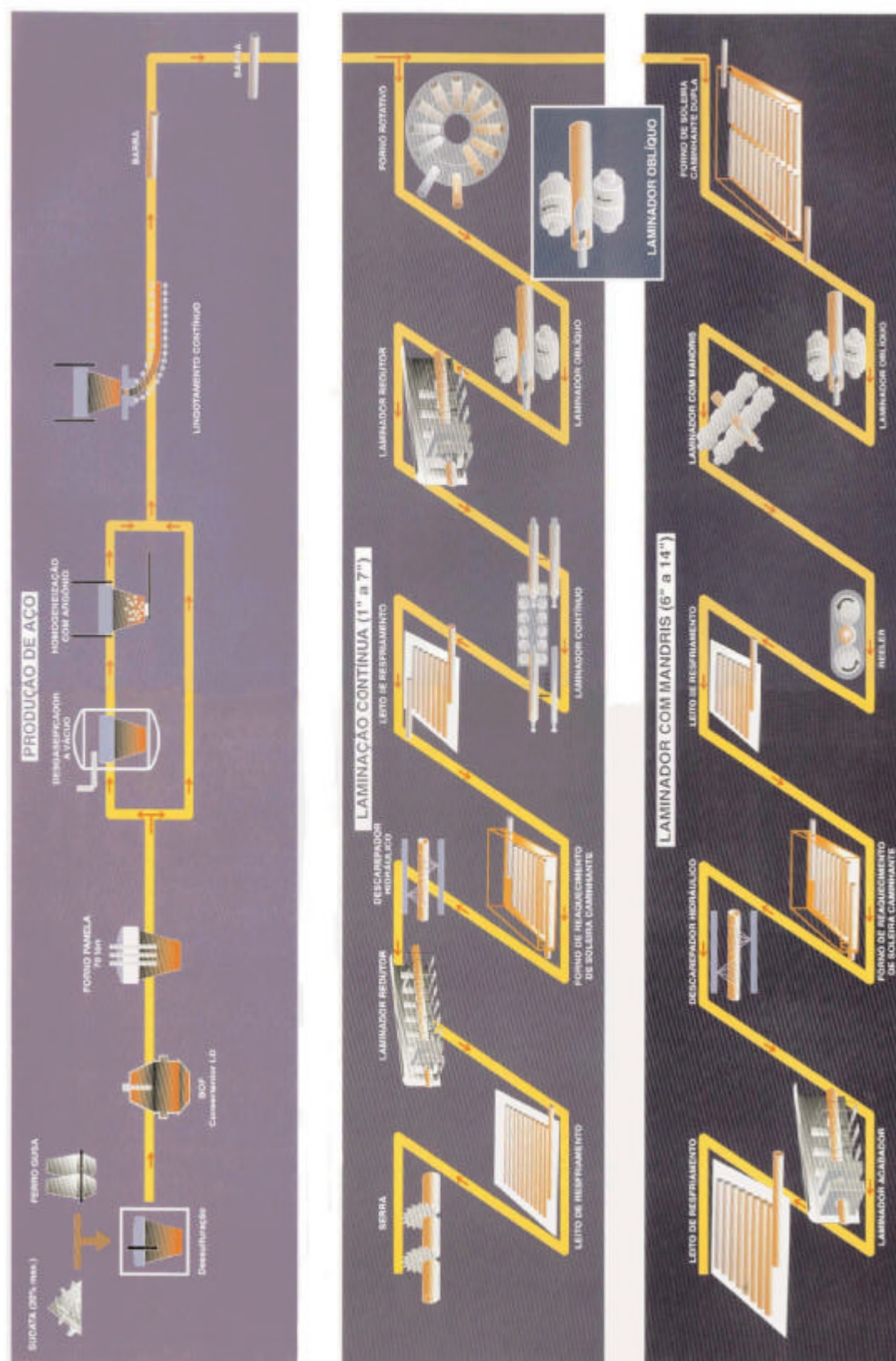


Figura 1.4.1 – Fluxograma de produção da VMB. Fonte: Institucional VMB (2003)

1.5 O PROBLEMA

No Brasil, a tarifação da energia elétrica consumida por empresas é constituída, basicamente, por dois componentes: uma tarifa para energia consumida (usualmente medida em kWh ou em MWh) e outra tarifa para demanda por potência (normalmente medida em kW ou em MW).

Para a VMB, a quantidade de energia consumida (kWh ou MWh) é, grosso modo, função da quantidade de tubos produzidos. Assim sendo, não é possível alterar a quantidade de energia consumida no curto prazo, pois economias deste naipe somente seriam viáveis, em primeira análise, através de maior eficiência dos equipamentos ou mudança de processo de fabricação.

Como consequência, procura-se controlar os gastos com energia no dia-a-dia através do monitoramento do segundo componente da tarifa: a demanda por potência. O contrato da empresa com o fornecedor de energia elétrica (no caso estudado, a CEMIG), como a maioria dos contratos de fornecimento de energia elétrica, estabelece um limite de potência média demandada. Esta potência média é calculada a cada 15 minutos. Caso o resultado ultrapasse o limite estabelecido em contrato, a VMB é obrigada a pagar multas vultosas.

Para evitar que o limite de demanda estipulado em contrato seja ultrapassado, a VMB utiliza um sistema de monitoramento da potência consumida em toda a usina. Este sistema faz uma projeção para o valor de potência média de cada intervalo de quinze minutos e, caso preveja que o limite de demanda contratado será ultrapassado, emite um alerta solicitando que algum equipamento seja desligado.

Devido a características das etapas de fabricação dos tubos de aço, o equipamento que normalmente é desligado quando há alerta do sistema de monitoramento é o Forno Panela (ver Figura 1.4.1 – Fluxograma de produção da VMB). Parar a operação de outros equipamentos pode causar resfriamento e condensação do aço liquefeito, diminuição da temperatura do aço para níveis abaixo do aceitável para processos como lingotamento e laminação, entre outros. Assim sendo, o Forno Panela (FP), por permitir posterior re-aquecimento caso seja desligado, mostra-se como o equipamento cuja resposta a interrupções de funcionamento se configura como menos crítica.

Contudo, a etapa seguinte ao aquecimento no FP é o Lingotamento Contínuo (ver Figura 1.4.1 – Fluxograma de produção da VMB). O Lingotamento Contínuo (LC) exige que o material esteja em uma determinada temperatura para que as propriedades físicas necessárias para o lingotamento permitam conformação mecânica. Em decorrência, o LC restringe o tempo máximo que se pode manter o FP desligado na medida em que o primeiro não pode ficar sem material: se o FP permanecer por muito tempo desligado, o aço terá de ser reaquecido, gerando um atraso nesta etapa do processo; quando este atraso é maior do que o tempo de consumo de material pelo lingotamento, ocorre falta de material. Esta falta de material não pode acontecer porque representa um evento de altos custos (perda de seqüência, desperdício do setup do lingotamento, etc.)

Estas características impõem restrições difíceis de serem controladas: por um lado, deseja-se desligar o Forno Panela quando necessário para não ultrapassar o limite de demanda contratado. Por outro lado, desligar o Forno Panela indiscriminadamente pode prejudicar demasiadamente o processo produtivo.

O problema consiste em estudar os efeitos do desligamento do Forno Panela nos processos subsequentes, levando em conta a questão da limitação da demanda por energia elétrica.

1.6 MÉTODO PREVISTO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA

A modelagem em computador do sistema a ser estudado se mostra a maneira mais adequada de se resolver o problema. Isto se deve ao grande número de variáveis a ser controlado e à grande importância do fator cronológico e do seqüenciamento das atividades.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PESQUISA OPERACIONAL

Pesquisa Operacional é um método científico de tomada de decisões. Em linhas gerais, consiste na descrição de um sistema organizado com o auxílio de um modelo, e através da experimentação com o modelo, na descoberta da melhor maneira de operar o sistema.

A Pesquisa Operacional como a conhecemos surgiu durante a Segunda Guerra Mundial, resultado de estudos realizados por equipes interdisciplinares de cientistas contratados para resolver problemas militares de ordem estratégica e tática. (DA SILVA et al, 1995)

A Pesquisa Operacional se divide em duas grandes áreas: programação matemática e modelos probabilísticos.

2.1.1 Programação Matemática

Inclui técnicas como programação linear, análise de redes, programação dinâmica, teoria dos jogos, programação não-linear e programação inteira.

A Programação Matemática exige bons conhecimentos de modelagem e alto nível de abstração.

2.1.2 Modelos Probabilísticos

Podem ser divididos em: teoria das filas, teoria de inventários, cadeias de Markov, programação determinística/probabilística e simulação.

2.2 SIMULAÇÃO

2.2.1 O que é simulação?

Simulação é uma poderosa técnica de gerenciamento utilizada para análise e estudo de sistemas complexos. Em muitos casos, abordagens através de programação

matemática exigem muitas simplificações. Assim sendo, as soluções podem ser inferiores, não confiáveis ou inadequadas para implementação.

A Simulação pode ser definida como uma técnica que imita as operações de um sistema do mundo real à medida que ele evolui com o tempo. Isto é normalmente feito através de um modelo de simulação. O modelo assume algumas hipóteses a respeito do sistema expressas através de relações lógicas ou matemáticas. Em contraste com algumas técnicas de modelagem matemática, a simulação consiste em executar ou “rodar” o modelo ao longo do tempo para gerar amostras significativas de medidas de desempenho.

A idéia básica da simulação consiste em construir um modelo e testar alternativas a respeito do funcionamento do sistema. Em outras palavras, Simulação consiste em tentativa-e-erro. Testa-se uma alternativa, analisam-se os resultados da simulação e então procura-se avaliar questões do tipo “*what if*”, sempre procurando melhorar o desempenho do sistema.

Devido à abordagem tentativa-e-erro, muitas pessoas não acreditam em simulação por ela não garantir soluções matematicamente ótimas. Entretanto, retomando o que foi citado anteriormente, gerar uma solução ótima via programação matemática pode exigir uma série de simplificações. Uma solução ótima baseada em um número grande de simplificações pode não ser ótima para o sistema real. Neste sentido, poder-se-ia argumentar que um modelo de simulação traria uma resposta muito mais precisa, pois retrata bem todas as particularidades e complexidades do sistema representado. Além disso, a simulação deve ser conduzida com bom senso e por pessoas experientes. Isto pode aumentar a acuracidade das respostas obtidas.

A exemplo de muitas técnicas e metodologias, a Simulação surgiu nas décadas de 50 - 60 como uma aplicação militar, para melhorar a logística durante guerras. Naquela época, levava-se meses para construir modelos de simulação, pois era necessário programar em linguagens de programação antigas e pouco flexíveis. Como computadores foram se tornando mais acessíveis no decorrer dos anos, a Simulação foi se desenvolvendo até o estágio em que se encontra hoje: pacotes de simulação prontos oferecem uma série de recursos que reduzem drasticamente o tempo de construção de um modelo de simulação por facilitar a modelagem dos

elementos de um sistema. Tais recursos oferecem facilidade de uso e flexibilidade ao modelar sistemas complexos.

Podemos ver a seguir um comparativo entre dois paradigmas sobre facilidade de uso e flexibilidade:

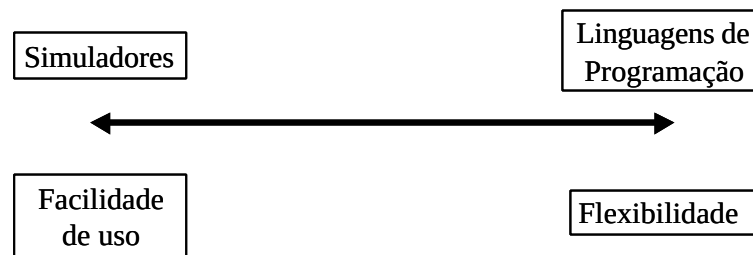


Figura 2.2.1.1 – Antigo paradigma que polarizava Flexibilidade e Facilidade de uso.

Fonte: HARREL; GHOSH; BOWDEN. (2000)

Simuladores são muitas vezes considerados capazes de solucionar problemas específicos e pré-determinados por oferecer recursos de modelagem específicos. Linguagens de programação, por outro lado, são consideradas mais flexíveis, mas com poucos elementos pré-preparados para auxiliar a modelagem. Estas afirmações eram válidas no início do ciclo de vida dos simuladores, o que originou um antigo paradigma visualizado na figura 2.2.1.1.

Atualmente, as distinções estabelecidas por aquele antigo paradigma se tornaram menos claras devido à combinação de linguagens de programação com elementos pré-preparados para facilitar a modelagem. As ferramentas de simulação mais modernas combinam elementos de modelagem pré-preparados para a indústria com capacidade de programação bastante flexível. Nos dias de hoje, existe um novo paradigma segundo o qual Facilidade de uso e Flexibilidade são características independentes:

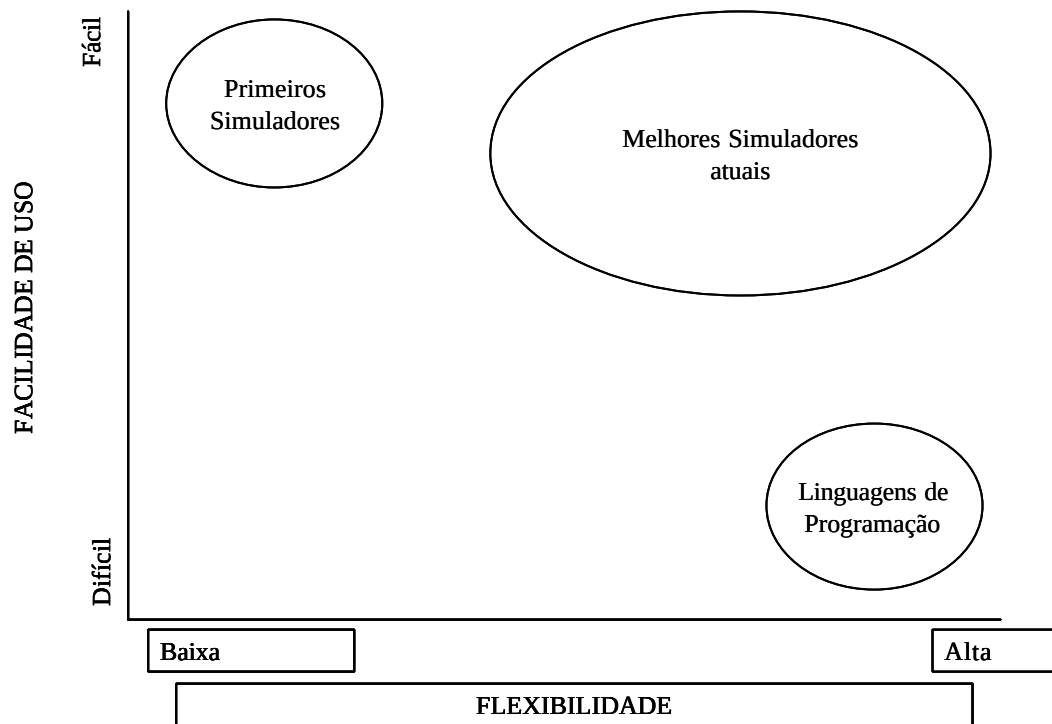


Figura 2.2.1.2 – Novo paradigma em que Flexibilidade e Facilidade de uso são independentes. Fonte: HARREL; GHOSH; BOWDEN. (2000)

2.2.2 Vantagens e Desvantagens da Simulação

Uma das vantagens básicas da Simulação é que esta técnica é de aplicação mais fácil se comparada a técnicas de programação matemática. Nos simuladores atuais, modelos são constituídos por elementos chamados locais, entidades, recursos, etc., que possuem características como capacidade, velocidade, tamanho, etc. Isto facilita a modelagem na medida em que os objetos do sistema modelado têm representações bem próximas à realidade, fato que não ocorre em programação matemática (em que objetos e restrições são modelados como variáveis, letras, equações, etc.). Isto fornece à Simulação maior flexibilidade para representar sistemas reais.

Como desvantagens da Simulação, podemos citar o fato de ela poder ser custosa. Além de exigir pessoas hábeis e treinadas para sua execução, a Simulação exige investimentos representativos, por ser uma tecnologia de desenvolvimento recente (pelo menos no que diz respeito à difusão dos pacotes de simulação mais

modernos entre universidades e empresas). Além de custosos em algumas ocasiões, modelos de simulação podem ser específicos e difíceis de serem adaptados para outros casos. Na maioria das vezes, é mais fácil construir um modelo completo ao invés de adaptar um modelo já existente para outra situação parecida. Outra desvantagem da simulação, apesar de não ser considerada uma real desvantagem por alguns autores, é o fato de a simulação não ser matematicamente otimizante.

Contudo, o desenvolvimento de pacotes de simulação cada vez mais avançados tem propiciado a diminuição dos custos de um projeto de simulação, bem como a maior facilidade de adaptação de modelos pré-existentes (parametrizados) para situações pré-concebidas. A questão de resultados não otimizados também vem sendo tratada pelas empresas responsáveis pelo desenvolvimento de simuladores. Já existem pacotes que permitem a otimização via algoritmos genéticos, no qual o próprio computador executa milhares ou milhões de rodadas do modelo automaticamente. Os algoritmos genéticos auxiliam o computador a escolher quais rodadas executar, diminuindo o tempo de simulação significativamente.

2.2.3 Por que simular?

Segundo BATEMAN et al. (1997), existem várias razões pelas quais deve-se utilizar Simulação:

- Simulação pode adicionar criatividade ao processo de resolução de problemas: medo de falhar impede os funcionários de oferecerem sugestões baseadas nos seus conhecimentos, idéias e criatividade. A Simulação oferece a possibilidade de se testar idéias sem riscos, estimulando pensamentos do tipo “vamos experimentar para ver”.
 - Simulação pode prever resultados: muitas vezes, não é viável executar testes na operação real. Isto se deve a altos custos (por exemplo, testar layouts diferentes para uma fábrica é inviável por causa dos altos custos de parada e de mudança de lugar dos equipamentos), por impossibilidade de se testar algo fisicamente (como a escolha de local para uma nova fábrica. Uma vez construída, esta não pode ser mais mudada de lugar) ou por outros motivos.
-

- Simulação leva em conta as variâncias do sistema: ao contrário de modelos matemáticos estáticos (baseados em médias), a simulação pode introduzir variabilidade nas análises. À medida que o número de variáveis chamadas estocásticas aumenta, mais difícil se torna a análise:

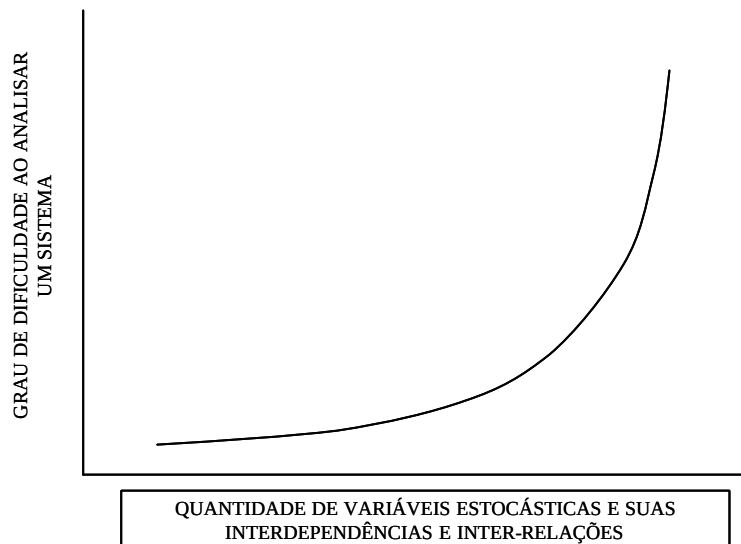


Figura 2.2.3.1 – Relação entre quantidade de variáveis estocásticas e grau de dificuldade ao analisar um sistema. Fonte: HARREL; GHOSH; BOWDEN. (2000)

- Simulação promove soluções totais: ao invés de soluções divididas entre vários departamentos das empresas, a Simulação propõe o desenvolvimento de soluções para sistemas como um todo.
- Simulação pode ser financeiramente viável: com o desenvolvimento de simuladores modernos, os custos de um projeto de simulação têm sido reduzidos expressivamente.

2.2.4 Utilizando Simulação

Simulação é quase sempre parte integrante de projeto ou de melhoria de um sistema. Quando se faz necessário projetar algo ou quando é preciso conseguir melhorias, existem soluções alternativas que são geradas e avaliadas. A melhor solução é escolhida e implementada. A Simulação entra em cena durante a fase de

avaliação: ela permite que se modelem as soluções alternativas para que, através de um processo iterativo de modelagem, simulação e análise, determine-se qual solução é a melhor.

Simulação consiste essencialmente em uma ferramenta de experimentação. Constrói-se um modelo em computador para se conduzirem experimentos. Conhecimento adquirido com a experimentação no modelo pode ser transferido para o sistema real:

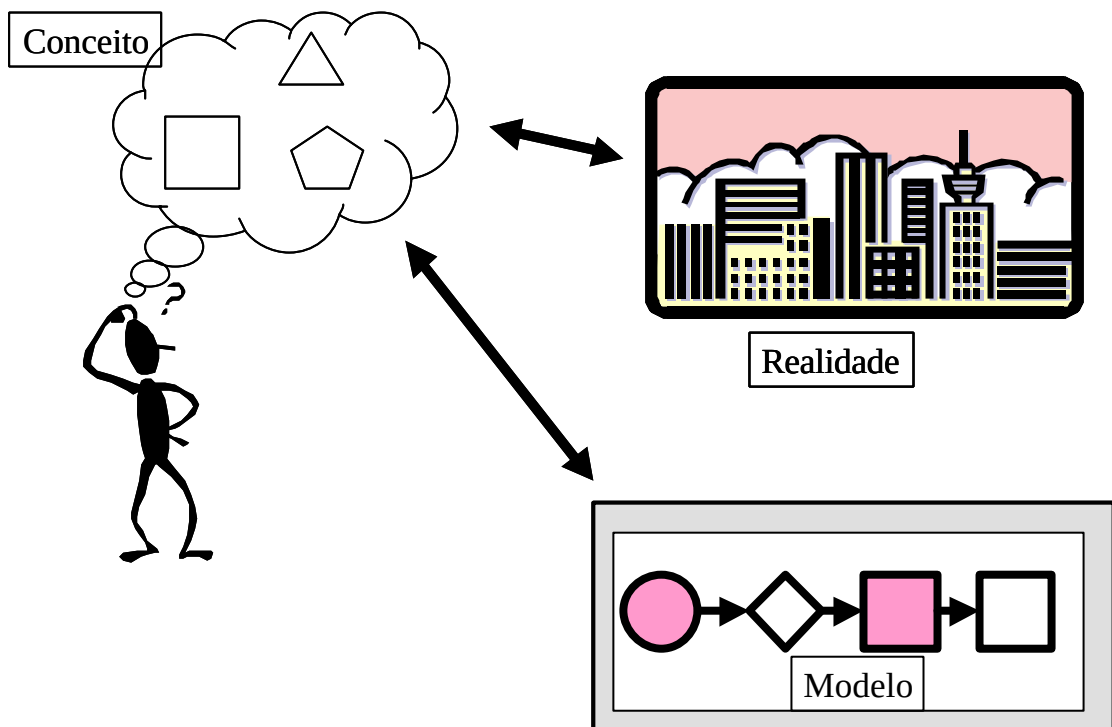


Figura 2.2.4.1 Simulação fornece uma maneira virtual de se fazer experimentação. Fonte: HARREL; GHOSH; BOWDEN. (2000), adaptado pelo autor.

Fazer experimentos em um modelo, ao invés do sistema real, reduz tempo, custo e prejuízos causados por experiências no sistema real. Neste sentido, a Simulação pode ser pensada como uma ferramenta de prototipagem virtual.

O procedimento para condução da Simulação segue o método científico: formulação de uma hipótese, preparação de um experimento, teste da hipótese por experimentação e conclusões a respeito da validade da hipótese. Este processo é repetido até que se esteja satisfeito com os resultados:

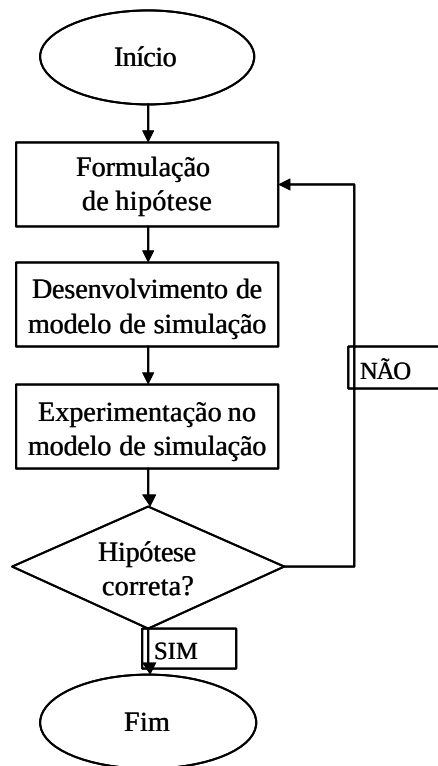


Figura 2.2.4.2 Processo de experimentação através de simulação. Fonte: HARREL; GHOSH; BOWDEN. (2000)

2.2.5 Quando Simulação é a técnica apropriada?

Nem todos os problemas que poderiam ser resolvidos com Simulação devem sê-lo. É importante selecionar a ferramenta correta para a tarefa a se executar. Não se deseja utilizar um “canhão para matar uma mosca”.

A Simulação tem certas limitações que devem ser conhecidas antes de se aplicá-la a uma dada situação. Ela não é um “santo-remédio” e deve ser aplicada somente quando adequado. Em linhas gerais, Simulação é a ferramenta adequada quando as seguintes condições são satisfeitas:

- Uma decisão operacional está sendo tomada;
- O processo analisado é repetitivo e bem definido;
- Atividades e eventos demonstram interdependência e variabilidade;
- O impacto da decisão no custo é maior do que o custo de se simular;
- O custo de fazer experimentações no sistema real é maior do que o custo de fazer simulação.

2.2.6 Justificativa para escolha de Simulação para solução do problema

Tendo em vista os conceitos apresentados sobre Simulação, pode-se retomar o item 1.6 MÉTODO PREVISTO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA e justificar a escolha da Simulação como ferramenta para desenvolvimento do estudo.

O problema do controle de demanda por energia elétrica na VMB exige uma resposta quantitativa. Para obtê-la, não há nada melhor do que um estudo baseado em modelagem computacional. Existem então duas alternativas: Programação Matemática ou Modelagem Probabilística.

Preferiu-se Simulação a Programação Matemática e Modelos Analíticos por algumas razões:

- O problema em questão envolve grande número de variáveis a serem controladas, o que exige alto grau de abstração para construção de um modelo matemático. Simulação, por outro lado, permite uma abordagem mais direta;
- Existe variabilidade nos tempos de processo a serem analisados. Simulação retrata melhor a variabilidade estatística dos processos;
- O fator cronológico é de extrema importância, já que se deseja simular a atuação do sistema de monitoramento da demanda por energia. Este sistema emite um aviso a cada quinze minutos, como descrito. Avaliar os acontecimento ao longo do tempo é fundamental; Introduzir o fator cronológico em programação matemática é um problema bastante complexo.

Estas razões em conjunto levam à conclusão de que Simulação é a ferramenta mais adequada para o estudo.

Como exemplo de projetos similares nos quais simulação foi aplicada com sucesso, pode-se citar o caso apresentado na Winter Simulation Conference de 2001 por Thomas F. Brady (ver Anexo A: Estudo de caso apresentado na Winter Simulation Conference).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta uma compilação sobre os passos de um projeto de simulação sugeridos por HARREL; GHOSH; BOWDEN (2000), BATEMAN et al. (1997), SHANNON (1975), GORDON (1978) e ProModel User's Guide (2002).

3.1 PASSOS DE UM PROJETO DE SIMULAÇÃO

Simular requer mais que simplesmente saber como se usar um SW de simulação; um estudo de simulação é, por sua natureza, um PROJETO. Como qualquer projeto, existem etapas a serem cumpridas e recursos que são necessários para cumpri-las. Para se ter sucesso, um projeto de simulação deve ser planejado com conhecimento das necessidades de cada etapa envolvida. Muitas falhas resultam de se pular diretamente para a modelagem e simulação sem primeiro deter-se para considerar os passos envolvidos e desenvolver um plano de procedimento.

A modelagem para simulação requer habilidades analíticas, organizacionais, de engenharia e comunicação. O analista deve conhecer o sistema que está sendo modelado e estar apto a escolher, através de complexas relações de causa e efeito que determinam a performance do sistema. Um conhecimento básico mínimo de estatística é necessário para se elaborar experimentos e corretamente analisar e interpretar os dados de entrada e saída. Também é vital a comunicação com os clientes e demais pessoas envolvidas durante todo o processo, garantindo que todos entendam o objetivo, as considerações e resultados do estudo.

3.1.1 Procedimento Geral

A decisão de se fazer uma simulação normalmente resulta de uma percepção de que esta ferramenta pode ajudar a determinar um ou mais resultados, associados a um projeto de um novo sistema ou a modificação de um sistema já existente.

Uma vez que um projeto tenha sido identificado como candidato para a simulação, decisões sobre a condução do estudo devem ser tomadas. Não há regras precisas sobre como conduzir um estudo de simulação. No entanto, os passos seguintes são geralmente recomendados como linha guia (SHANNON, 1975; GORDON, 1978):

1. Planejar o estudo
2. Definir o sistema
3. Construir o modelo
4. Rodar experimentos
5. Analisar os outputs
6. Fazer relatório dos resultados

O processo de simulação é interativo e cada atividade é definida e algumas vezes redefinida com a interação:

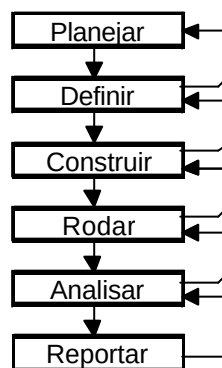


Figura 3.1.1.1 – Natureza interativa de projetos de simulação. Fonte: ProModel User's Guide (2002)

Nas páginas seguintes, analisar-se-á cada passo apresentado recomendado.

3.1.1.1 Passo 1: Planejamento do estudo

O planejamento de um estudo de simulação envolve as seguintes sub-tarefas:

- Definir objetivos
- Identificar as restrições
- Preparar as especificações da Simulação

As sub-tarefas apresentadas serão discutidas a seguir.

3.1.1.1.1 Definição dos objetivos

Com um entendimento básico do sistema e consciência de seus pontos de interesse, um ou mais objetivos podem ser definidos para o estudo. A simulação só deve ser feita se um objetivo pode ser claramente determinado e se a simulação for a ferramenta ideal para atingir este objetivo. Definir um objetivo não significa necessariamente que há um problema conhecido para ser resolvido; um objetivo perfeitamente válido pode ser verificar se há no sistema um problema que ainda não foi visualizado.

Para compreender os objetivos de uma simulação, devemos considerar tanto o propósito quanto a intenção de seu uso. As questões a seguir podem ajudar neste processo:

- Por que se está usando simulação?
- Quem usará o modelo?
- Para quem os resultados da simulação serão apresentados?
- Quais as informações que serão esperadas do modelo?
- Este é um modelo descartável?
- Qual é a importância da decisão a ser feita?

3.1.1.1.2 Identificando as restrições

Tão importante quanto definir os objetivos é determinar as restrições sob as quais o estudo deve ser conduzido. Não se pode permitir que a simulação resolva o problema e o tempo do estudo ultrapasse o limite para a aplicação da solução, ou que o custo de se achar a solução exceda o benefício conseguido. Os objetivos devem ser amarrados pelas restrições do projeto tais como budget, prazos, disponibilidade de recursos, etc.

As restrições não devem ser vistas sempre como um impedimento. Se nenhum prazo ou nenhuma outra restrição são estabelecidos, há o perigo de se envolver demais no estudo de simulação e correr o risco da “paralisia pela análise”. O escopo de um projeto tem a tendência de se encolher ou expandir para utilizar todo o tempo alocado.

Na identificação das restrições, tudo que tiver um efeito limitante em relação ao cumprimento dos objetivos deve ser considerado. Veja as seguintes questões:

- Qual é o budget para o estudo?
- Qual é o prazo para se realizar o estudo?
- Qual é a competência das pessoas que estão fazendo o estudo?
- Os dados de input são acessíveis? Em que grau?
- Qual é o equipamento que será utilizado?

3.1.1.1.3 Preparando a especificação da simulação

Com os objetivos claramente definidos e conhecidas as restrições, as exigências da simulação podem ser determinadas. Definir as especificações da simulação é fundamental para se projetar o tempo e custo que serão necessários para completar o estudo. As especificações também ajudam a guiar o estudo e a deixar bem claro para todos exatamente o que a simulação incluirá ou excluirá. Os aspectos do projeto de simulação que devem ser incluídos na especificação incluem os seguintes pontos:

- Escopo
- Nível de detalhes
- Precisão
- Tipos de experimentos
- Forma dos resultados

A seguir, pode-se ver mais detalhes sobre os pontos explicitados acima.

Escopo

O escopo se refere aos limites do sistema ou a quanto o sistema irá englobar. Para se determinar o escopo do projeto, devemos nos basear em quanta relação ou impacto uma atividade em particular tem, no sentido de atingir os objetivos da simulação.

Na figura seguinte, vemos como o escopo do modelo deve estar confinado àquelas atividades, cujas interações têm efeito direto no processo estudado. As atividades anteriores e posteriores, que não causam impacto direto no sistema, devem ser ignoradas.

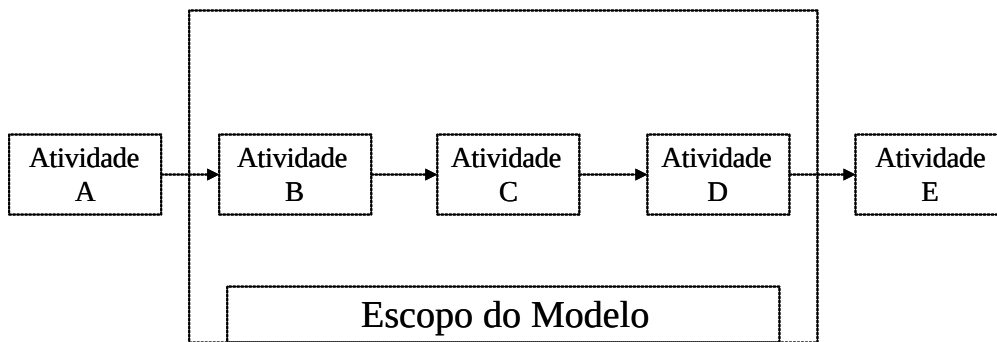


Figura 3.1.1.1.3.1 – Confinando o escopo para áreas de impacto. Fonte: HARREL; GHOSH; BOWDEN. (2000)

Nível de detalhes

O nível de detalhes define a profundidade ou resolução do modelo. Em um extremo, uma fábrica inteira pode ser modelada como uma “caixa preta” com um tempo de atividade aleatório. Em um outro extremo, cada movimento detalhado de uma máquina pode ser modelado com uma correspondência um a um retratando toda a operação da máquina.

Diferentemente do escopo, que afeta somente o tamanho do modelo, o nível de detalhe afeta a complexidade tanto quanto o tamanho. Determinar o nível apropriado de detalhes é uma decisão importante. Muitos detalhes tornam difícil e demorada a construção de um modelo válido; por outro lado, poucos detalhes podem tornar o modelo muito irreal pela exclusão de variáveis críticas. A figura a seguir ilustra como o tempo de desenvolvimento do modelo é afetado pelo nível de detalhes. Também evidencia a importância de se incluir somente o nível de detalhes suficiente para atingir os objetivos do estudo.

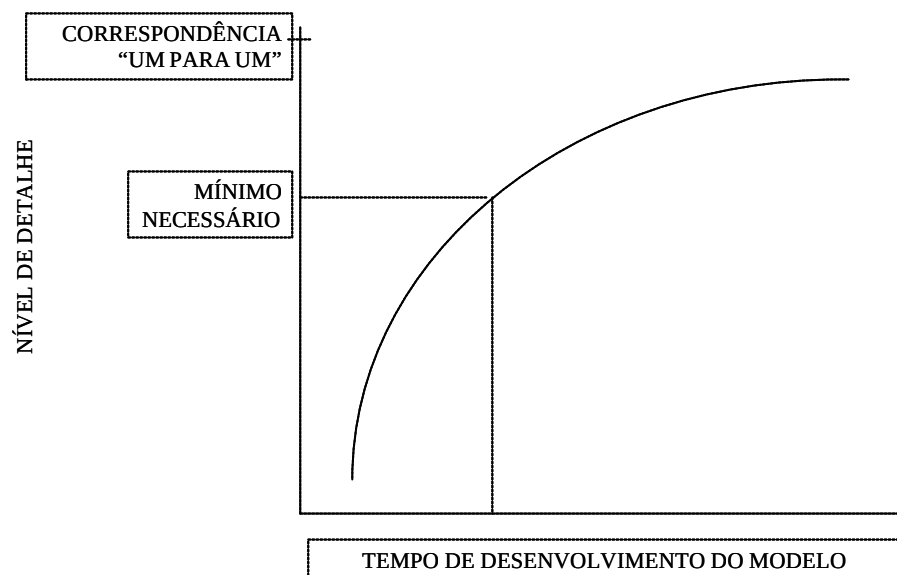


Figura 3.1.1.1.3.1 – Efeito do nível de detalhe no tempo de desenvolvimento de um modelo. Fonte: HARREL; GHOSH; BOWDEN. (2000)

Precisão

O grau de precisão diz respeito à correção dos dados usados. Para alguns modelos ou certas atividades, a informação não precisa ser acurada ou exata; em contrapartida, a informação precisa ser exata para outras. O grau necessário de precisão é determinado pelos objetivos do estudo. A acuracidade pode algumas vezes ser sacrificada se as informações não estão disponíveis como, por exemplo, quando modelamos um sistema totalmente novo.

Tipos de experimentos

A quantidade ou natureza das alternativas de soluções a serem testadas deve ser planejada desde o início, de forma a assegurar que o tempo adequado está sendo alocado. Frequentemente, esta decisão é influenciada pelo limite de prazo imposto. Quando as alternativas a serem calculadas diferem muito pouco, um modelo base pode ser construído de forma a requerer somente pequenas modificações para modelar cada alternativa. Se as configurações das alternativas são significativamente diferentes, podemos ter que fazer o mesmo esforço para realizar os vários modelos quanto para desenvolver um modelo básico inicial.

Forma dos resultados

A forma em que os resultados serão apresentados pode afetar significativamente o tempo e o esforço envolvidos no estudo de simulação. Se animação detalhada ou relatórios extensivos são esperados, o projeto pode se estender por várias semanas antes da fase experimental poder ser completada. Muitas vezes, o único resultado requerido é verificar se um sistema é capaz de atingir um determinado patamar de produção. Nestes casos, uma simples resposta bastará.

3.1.1.2 Passo 2: Definição do Sistema

Com objetivos claramente definidos e um plano de estudo bem organizado, o sistema em questão pode começar a ser simulado em detalhe. Isto pode ser visualizado como o desenvolvimento de um modelo conceitual sobre o qual o modelo de simulação será baseado. O processo de reunião dos dados do sistema pode ser dominado pela pilha de dados sem correlação, que temos de investigar. Os dados raramente estão na forma exata que melhor pode representar o funcionamento do sistema. Muitos dos esforços de busca de dados acabam com uma montanha de dados, mas sem a menor informação útil.

A reunião de dados nunca deve ser feita sem um propósito. Ao invés de se procurar por todos os lados, a busca pelas informações deve ser orientada ao objetivo, com foco sobre as informações que ajudam a atingir as metas do estudo.

Para ajudar o processo de levantamento de dados para a definição do sistema, os passos seguintes são recomendados:

- Determinar as necessidades em termos de dados;
 - Usar as fontes apropriadas;
 - Fazer suposições quando necessário;
 - Converter os dados para uma forma útil;
 - Documente e aprove (valide) os dados.
-

3.1.1.3 Passo 3: Construção do modelo

Uma vez que compilamos as informações necessárias para a operação básica do sistema, a atividade de construção do modelo pode iniciar. Enquanto iniciar a construção do modelo muito cedo pode ser uma atividade desperdiçada, esperar até que todas as informações sejam completamente levantadas pode provocar um atraso desnecessário. Iniciar a construção do modelo antes que todas as informações sejam colhidas ajuda a identificar informações necessárias ainda não vistas.

Uma boa característica da simulação é que os modelos não precisam conter todos os detalhes finais antes de serem executados. Isto permite um refinamento progressivo no qual detalhes são incluídos por estágios, ao invés de todos ao mesmo tempo. O método de refinamento progressivo, além de facilitar a construção do modelo, torna mais fácil a correção de defeitos.

Enfatizando a importância de se aplicar o refinamento progressivo na construção do modelo, LAW e KELTON apud HARREL; GHOSH; BOWDEN (2000) alertam:

“Ainda que haja poucas regras sobre como alguém deve construir modelos, a maioria dos autores concorda que é sempre uma boa idéia começar com um modelo simples que pode mais tarde vir a ser sofisticado se necessário. Um modelo deve conter apenas detalhes suficientes para captar a essência do sistema para os propósitos do estudo: não é necessário ter uma relação um-a-um entre os elementos do modelo e os elementos do sistema real. Um modelo com muitos detalhes pode ser muito caro de se construir e rodar”.

Durante todo o processo de construção do modelo, o modelador deve estar constantemente atento à fidelidade com que o modelo reflete as definições do sistema. Este processo chama-se VALIDAÇÃO. Ter um modelo válido significa que, por todos os aspectos externos, o mesmo parece ser uma acurada representação do sistema real. Deste ponto de vista, validar um modelo é o processo de confirmar que o modelo, em seu domínio de aplicabilidade, é suficientemente acurado para a aplicação pretendida.

Não há nenhum teste simples para estabelecer a validade do modelo. A validação é um processo indutivo no qual extraem-se conclusões sobre a acurácia do

modelo baseada nas evidências disponíveis. O levantamento das evidências para determinar a validade do modelo é freqüentemente determinado pelo exame da estrutura do modelo (por exemplo, os algoritmos e os relacionamentos) para ver se ela corresponde às definições do sistema real. Para modelos com lógicas complexas de controle, a animação gráfica é uma boa ferramenta para a validação. Finalmente, as saídas (*outputs*) devem ser analisadas para ver se os resultados parecem razoáveis. Se as circunstâncias permitem, o modelo pode ser comparado com o sistema atual e pode-se ver se eles correspondem. Se estes procedimentos são executados sem que se encontre uma discrepância entre o sistema real e o modelo, é dito que o modelo está validado.

3.1.1.4 Passo 4: Experimentação

O quarto passo em um estudo de simulação é conduzir experimentos com o modelo. Em um experimento de simulação, existem variáveis de entrada independentes que podem ser manipuladas ou variadas. Os efeitos destas manipulações sobre as variáveis dependentes ou de resposta são medidos e correlacionados.

Esta é uma das fases mais interessantes de um projeto de simulação: durante a experimentação, estimula-se a criatividade e as sugestões baseadas em conhecimento e experiências pessoais. Não existem restrições orçamentárias ou de viabilidade sobre os experimentos a serem conduzidos, desde que estes estejam previstos no escopo do projeto. Pode-se, por exemplo, contratar um grande número de empregados ou adquirir uma gama de máquinas mais rápidas e eficientes sem se preocupar com reações dentro da empresa. No momento, interessa-se apenas pelos resultados dos experimentos.

3.1.1.5 Passo 5: Análise dos *outputs*

A análise dos *outputs* lida com a extração de conclusões sobre o sistema através das saídas da simulação. Durante a condução de experimentos, deve-se tomar extremo cuidado ao interpretar os resultados da simulação.

O mais valioso benefício da simulação é obter insight, e não necessariamente achar respostas absolutas. Com isto em mente, deve-se evitar o imediatismo em relação aos *outputs* da simulação. Com mais de 60 anos de experiência em se fazer simulações, CONWAY, MAXWELL E WORMAN apud ProModel User's Guide (2002) enfatizam uma leitura prática e intuitiva dos resultados da simulação. A recomendação seria “se não está ‘na cara’, esqueça”.

A meta de se conduzir experimentos não é saber se um sistema se comporta bem, mas ganhar suficiente insight para melhorá-lo. Infelizmente, os *outputs* do sistema raramente identificam a causa do problema. Na maioria das vezes, eles somente reportam o comportamento sintomático dos mesmos. Atividades gargalo, por exemplo, são normalmente identificadas pela observação de filas que estão quase sempre cheias. Detectar a fonte do gargalo é um pouco mais trabalhoso do que identificar o próprio gargalo. Os gargalos podem ser causados por tempos excessivos de operações, esperas prolongadas devido à indisponibilidade de recursos ou uma quantidade expressiva de paradas. A habilidade de extrair conclusões corretas dos resultados é essencial para fazer melhorias no sistema.

3.1.1.5 Passo 6: Informação de resultados

O último passo de um projeto de simulação é fazer recomendações para melhorias no sistema atual baseadas nos resultados do modelo. Estas recomendações devem ser bem apresentadas e embasadas de forma a permitir que se tomem decisões. Afinal, Simulação é uma ferramenta de apoio à tomada de decisões. Documentações a respeito dos dados usados, do(s) modelo(s) criado(s) e dos experimentos realizados devem ser incluídos como partes do relatório final da simulação.

A animação e os gráficos são excelentes ajudas na comunicação dos resultados dos estudos.

Após o final da apresentação e quando não há mais nenhuma análise a ser feita (normalmente ocorrem sugestões de se fazer isto ou aquilo com o modelo durante a apresentação final) as recomendações, se aceitas, estão prontas para serem

implementadas. Se a simulação foi adequadamente documentada, ela deve prover uma boa especificação para o time de implantação.

3.2 METODOLOGIA – RESUMO E CONCLUSÕES

Um projeto de simulação tem fases distintas que devem ser compreendidas e seguidas de forma a obter o sucesso. A simulação requer planejamento cuidadoso com metas e expectativas realistas. Os passos para se realizar um estudo de simulação incluem: planejar o estudo, definir o sistema, construir o modelo, realizar os experimentos, analisar os *outputs* e apresentar os resultados.

Seguir estes passos sistematicamente contribui para evitarem-se as armadilhas de projetos de simulação. Portanto, esta metodologia será seguida no trabalho de formatura. A aplicação da metodologia será apresentada no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

4.1 APLICAÇÃO DOS PASSOS DE UM PROJETO DE SIMULAÇÃO

Seguindo o roteiro apresentado na metodologia para resolução do problema, procura-se o desenvolvimento de um projeto de simulação bem sucedido.

Neste capítulo, encontram-se descrições de cada passo do projeto de simulação aplicados ao estudo na V&M do Brasil.

Deve-se ressaltar que, devido à interatividade das etapas apresentada no capítulo 3, as descrições apresentadas abaixo representam o resultado final das diversas interações realizadas.

4.2 PROCEDIMENTO GERAL

4.2.1 Passo 1: Planejamento do estudo

Sub-tarefas:

- Definir objetivos
- Identificar as Restrições
- Preparar as especificações da Simulação

4.2.1.1 Definição dos objetivos

Para melhor definir os objetivos do projeto, respondeu-se às questões apresentadas na metodologia do trabalho:

- Por que se está usando simulação?
 - o Resp: A simulação será utilizada por se mostrar a ferramenta mais adequada para analisar o problema, que envolve grande número de variáveis, interdependência e complexidade.
 - Quem usará o modelo?
 - o Resp: O modelo será utilizado pelo autor para fornecer respostas à VMB. O modelo também será utilizado pela Belge Engenharia para marketing e como referência de projetos na área energética.
 - Para quem os resultados da simulação serão apresentados?
-

- o Resp: Os resultados serão apresentados para a equipe da VMB participante do projeto, para os colegas de trabalho da Belge Engenharia para conhecimento interno à empresa e para os professores do Departamento de Engenharia de Produção da USP, como trabalho de formatura.
- Quais as informações que serão esperadas do modelo?
 - o Espera-se que o modelo informe o consumo de energia elétrica frente a diversas condições de operação da usina siderúrgica.
- Este é um modelo descartável?
 - o Este modelo não visa ter aplicações além do estudo a ser feito. Entretanto, o mesmo poderá ser ampliado.
- Qual é a importância da decisão a ser feita?
 - o A decisão a ser feita envolve valores em dinheiro elevados, pois a energia elétrica representa um insumo de alto volume de consumo na VMB. Além disso, a decisão é importante porque a área envolvida no estudo é responsável justamente pela energia elétrica na usina.

Com as respostas acima em mente, o objetivo do projeto foi definido em conjunto com a Gerência Energia e Utilidades da VMB. Definiu-se que o estudo deve definir qual é o limite mínimo de potência contratada para que as interrupções impostas ao Forno Panela (em decorrência de alerta do sistema de monitoramento de potência demandada) não causem prejuízos à continuidade da operação no Lingotamento Contínuo, e conseqüentemente no restante do processo de fabricação.

4.2.1.2 Identificando as restrições

Deve-se responder às seguintes perguntas:

- Qual é o budget para o estudo?
 - o Resp: Este estudo não tem limitação de budget, pois foi oferecido à VMB sem custo. O único custo são as horas de bolsa-auxílio do autor correspondentes ao desenvolvimento do modelo em si.
 - Qual é o prazo para se realizar o estudo?
-

- o Resp: O prazo para realização do estudo é de aproximadamente 8 meses, que foi o período em que o autor cursou o quinto ano do curso de Engenharia de Produção.
- Qual é a competência das pessoas que estão fazendo o estudo?
 - o O autor tem experiência em projetos de simulação adquirida durante o período de estágio na Belge Engenharia. Participou de diversos projetos que incluem clientes como Ryder Logística, Gillette, CST, Companhia Vale do Rio Doce e Gerdau. Projetos desta última empresa (Gerdau) são em alguns aspectos semelhantes ao desenvolvido neste Trabalho de Formatura, pois a Gerdau faz parte do grupo das grandes siderúrgicas brasileiras.
 - o Os profissionais da Gerência Energia e Utilidades, da VMB, são profundos conhecedores do processo produtivo e das questões referentes à energia elétrica na usina. Apesar de não conhecerem simulação, esta tecnologia foi-lhes apresentada em reuniões para que a visão de todos em relação ao projeto ficasse alinhada.
- Os dados de input são acessíveis? Em que grau?
 - o A VMB colocou à total disposição um engenheiro para fornecer quaisquer informações necessárias. Caso este engenheiro não dispuser das informações, o mesmo tem liberdade para contatar outras pessoas que considerar mais aptas a fornecer os dados necessários.
- Qual é o equipamento que será utilizado?
 - o Os equipamentos a serem utilizados são os computadores das salas pró-aluno da Escola Politécnica, o computador da residência do autor e o computador que o autor utiliza em seu local de estágio.

Analisando estas respostas, fica claro que a principal restrição é o tempo de trabalho disponível, pois o autor desenvolve outras atividades além do trabalho de formatura (aulas do curso de Engenharia de Produção, trabalhos das disciplinas, estágio, entre outras).

Outra restrição importante é a falta de conhecimento das pessoas da VMB envolvidas no projeto no tocante à simulação. Tentou-se contornar esta restrição com apresentação da tecnologia e discussão conjunta das etapas do projeto.

4.2.1.3 Preparando a especificação da simulação

4.2.1.3.1 Escopo

O escopo do projeto, definido em conjunto com a VMB, contempla as etapas do processo de fabricação de tubos desde a entrada de material no Forno Panela até que o aço passe pelo Lingotamento Contínuo. A figura abaixo melhor representa estas atividades:

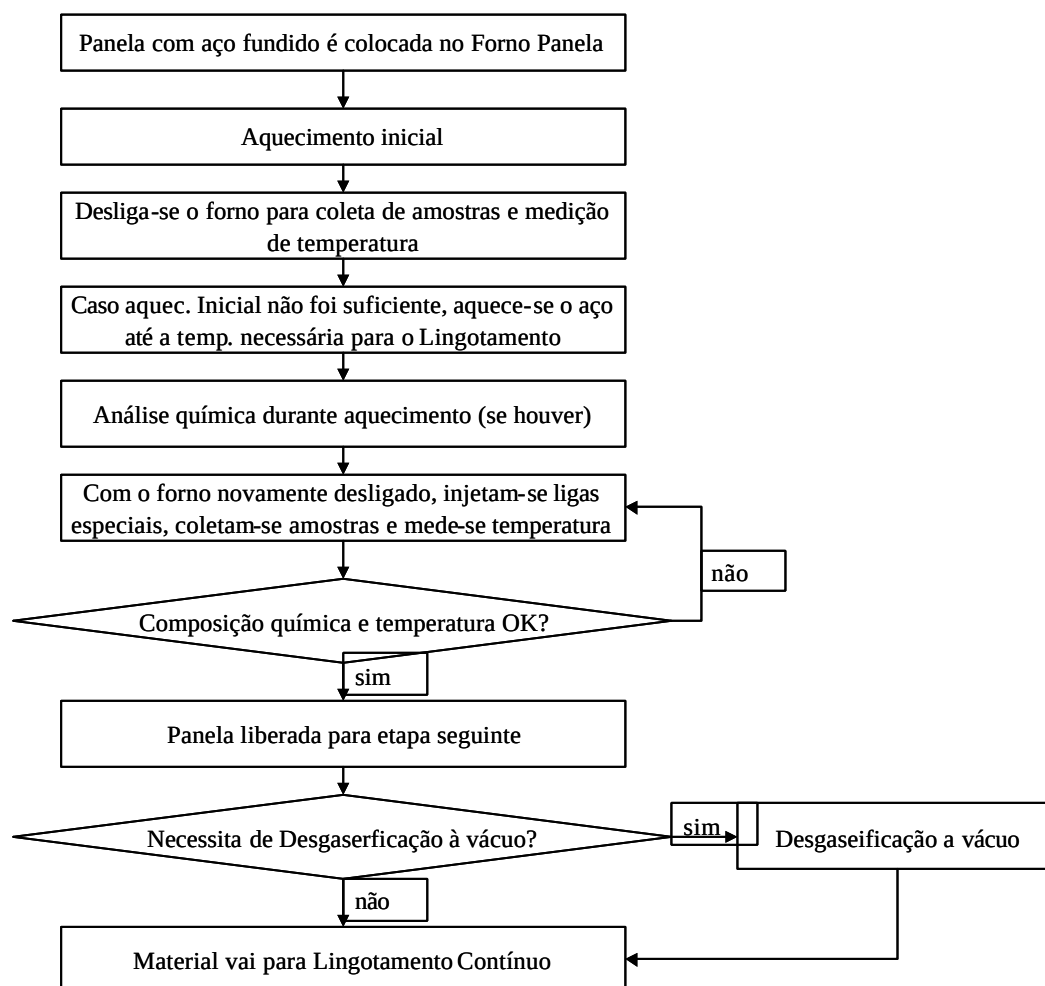


Figura 4.2.1.3.1.1 – Etapas contempladas pelo escopo do projeto. Elaborado pelo autor.

4.2.1.3.2 Nível de detalhes

Para possibilitar a construção do modelo, decidiu-se adotar algumas simplificações adequadas para o tipo de resposta que se quer obter.

A primeira delas diz respeito ao tipo de simulação a ser realizada. Ao invés de se basear no plano de produção da fábrica, que tem centenas de produtos com características diferentes, decidiu-se simular “corridas” de produção. Uma corrida de produção representa um conjunto de bateladas do mesmo produto, que são feitas em seqüência. Desta forma, não é necessário preparar o modelo para diferentes tipos de produtos durante a simulação. Basta modelar o produto a ser fabricado nas diferentes corridas. Isto facilita a modelagem, pois modelar vários produtos em rodadas separadas do modelo é mais simples do que rodar vários produtos diferentes na mesma rodada do modelo.

A adoção de uma corrida de produção como horizonte a ser simulado permitiu que a questão dos horários de ponta e fora de ponta (faixas de horário em que as tarifas de energia elétrica variam) não fosse levada em conta dinamicamente. Poderia-se imaginar um modelo que muda as tarifas de energia dependendo do horário do dia. Entretanto, isto demandaria que o plano de produção fosse modelado com alto nível de detalhes, incluindo horários de início e de conclusão de tarefas previstos e realizados. Para evitar este detalhamento excessivo, decidiu-se que a rodada do modelo contemplará a questão ponta X fora de ponta supondo-se que a corrida inteira foi realizada no período de ponta ou fora dele.

Com estas hipóteses, a variável principal do estudo consiste na diferença de temperatura entre a entrada e a saída do Forno Panela. Isto porque o desligamento do mesmo influencia seu tempo de processo proporcionalmente à diferença de temperatura mencionada.

Para evitar a introdução de diversas temperaturas de entrada e de saída (já que cada um do grupo de centenas de produtos diferentes tem temperatura de entrada e de saída diferentes), foi sugerido pela VMB que o modelo fosse construído levando em conta apenas a diferença de temperatura de entrada e de saída. Isto porque, apesar de as temperaturas absolutas de entrada e de saída serem diferentes para cada produto, o “delta” (diferença) de temperatura se mantém quase que constante. Esta

hipótese foi sugerida e considerada válida pela própria VMB. Com esta hipótese, o modelo pode ser construído para alguns grupos de produtos, ao invés de centenas de produtos diferentes.

Seguindo ainda sugestão da VMB, os produtos foram divididos em dois grupos. A classificação de um produto nos grupos depende de um processo pelo qual os produtos passam: a desgaseificação a vácuo. Dividiram-se os produtos em duas categorias: produtos “VD” (que passam pela desgaseificação a vácuo – vacuum degasser) e produtos “não-VD” (que não passam pelo processo de desgaseificação). O processo de desgaseificação a vácuo se destina basicamente ao melhor controle da composição química do aço.

Dividir os produtos em categorias dependentes do processo de desgaseificação é decorrente do maior tempo que produtos “VD” levam para chegar ao Lingotamento se comparados a produtos “não-VD”, que vão do Forno Panela diretamente para o Lingotamento. Devido a este intervalo de tempo maior que se passa até produtos “VD” chegarem no Lingotamento, a temperatura do aço deve ser maior na saída do Forno Panela se comparada com produtos “não-VD”. Além disso, o processo de desgaseificação envolve mistura do aço via jatos de argônio. Este é um gás inerte que não se mistura com o aço, mas que aumenta a perda de temperatura de produtos “VD” enquanto o material não chega ao Lingotamento.

Por último, o processo de desgaseificação a vácuo, por não ser representativo em termos de energia elétrica, não será modelado. Se o tempo deste processo for considerado constante, é indiferente incluir este processo no modelo ou não, pois ele representa apenas um “*delay*”. A hipótese de simular uma corrida por rodada em conjunto com o escopo do projeto permitem que a desgaseificação seja desconsiderada.

4.2.1.3.3 Precisão

Devido ao fato de o problema central a ser estudado estar localizado no Forno Panela, todos os dados referentes a ele e que o afetem devem ter bom grau de precisão.

O tempo do processo de desgaseificação a vácuo, como explicado no item anterior, será considerado constante, pois aquele não tem impactos diretos no objetivo do projeto. Este nível de precisão é considerado adequado para esta etapa do processo.

4.2.1.3.4 Tipos de experimentos

Deseja-se simular diversas corridas. Para cada corrida, será informado um parâmetro correspondente ao limite de demanda por potência contratado. Com base nesse limite, o sistema de monitoramento (que fará parte do modelo) atuará no Forno Panela, gerando atrasos no seu processamento caso necessário para que não se ultrapasse o limite de potência contratado. Deseja-se saber até qual limite pode-se abaixar o contrato sem que haja prejuízos para a produção. Entendam-se prejuízos como falta de material no Lingotamento Contínuo.

Assim, com as hipóteses assumidas e com o escopo que foi definido, deseja-se fazer experimentos do tipo “produto não-VD, com tarifa do horário de ponta, e limite de demanda de n MW. Nestas condições, faltará material no Lingotamento Contínuo?”

4.2.1.3.5 Forma dos resultados

Os experimentos descritos fornecerão diretrizes para a tomada de decisão na VMB. Por exemplo, se o modelo indicar que o limite de demanda contratada é demasiadamente alto para produtos “VD”, pode-se decidir não fabricá-los durante o período de ponta, no qual a energia custa mais caro. Raciocínio análogo vale para produtos “não-VD”.

4.2.2 Passo 2: Definição do Sistema

Definindo o Forno Panela como alvo principal do estudo e seguindo as diretrizes fornecidas pelo escopo do projeto (ver item 4.2.1.3.1 Escopo), pôde-se

definir quais são os dados necessários para a simulação. A tabela abaixo apresenta tais dados e o formato ou unidade requerida:

Tabela 4.2.2.1 – Dados necessários e formatação ou unidade requerida

Dado necessário	Formato ou Unidade
Variação da demanda por energia elétrica (medida em termos de potência) na usina como um todo, excetuando o Forno Panela (pois a demanda deste será calculada dinamicamente durante a simulação)	Histórico
Diferença entre temperatura de saída e de entrada do material quando este sai do Forno Panela em relação a quando o material entra no mesmo	°C
Perda de temperatura do material no Forno Panela quando este se encontra desligado	°C/min
Perda de temperatura do material no Forno Panela por adição de material (para formação de ligas)	°C/min
Taxa de aquecimento do Forno Panela	°C/min
Relação entre Taxa de aquecimento do Forno Panela e Potência Consumida	kW/(°C/min)
Tempo de Lingotamento de material contido em uma panela;	Amostragem
Limites de demanda contratados	kW ou MW
Tempo do aquecimento inicial	Amostragem
Tempo para coleta de amostras e para medição de temperatura	Amostragem
Tempo para injeção de ligas, coleta de amostras e medição de temperatura	Amostragem

Fonte: elaborado pelo autor

Todos estes dados foram requisitados aos profissionais da VMB, que colocaram à disposição seu conhecimento técnico e sua experiência com o processo produtivo para auxiliar no que fosse necessário.

Os dados, provenientes do sistema de monitoramento do processo, foram coletados para uma “corrida” de produção (série de bateladas executadas em seqüência) considerada representativa pela VMB e pelo autor. Como era de se esperar, os dados passados pela empresa não estavam na formatação adequada para utilização direta no modelo, o que fez com que algum trabalho fosse feito sobre as informações pelo autor para que a modelagem fosse possível. Podem ser citados como exemplo o cálculo dos intervalos entre processamentos no Forno Panela, cálculo das perdas de temperatura por adição de material, etc. Todos estes cálculos foram validados pelos profissionais da VMB.

Durante estes cálculos, decidiu-se desprezar o efeito de perda de temperatura por adição de material, pois este se mostrou desprezível: para a amostragem coletada, as perdas calculadas tiveram média de $0,14^{\circ}\text{C}$ e desvio padrão de $0,04^{\circ}\text{C}$. Como o modelo não tem este nível de precisão (pois é desnecessário e altamente custoso construir um modelo para esta situação com precisão de décimo de grau centígrado), não se faz necessário modelar estas perdas.

4.2.2.1 Informações sobre os dados coletados

Serão apresentadas algumas informações sobre os dados coletados para que fique claro o tipo de sistema que está sendo modelado. Para tanto, utilizar-se-á algumas informações padrão (como média e desvio padrão), mas isto não implica no uso destas informações padronizadas no modelo. Tais informações foram inseridas no modelo de simulação através de escolha de curvas estatísticas selecionadas pelo software de tratamento estatístico Stat::Fit.

Variação da demanda por energia excetuando o Forno Panela

Coletaram-se os dados referentes à variação de demanda em kW. As informações apresentadas abaixo estão, conseqüentemente, na unidade kW.

Tabela 4.2.2.1.1 – Informações sobre variação da demanda por energia excetuando Forno Panela

Estatística descritiva	
Mínimo	28798
Máximo	35011
Média	32445.3
Mediana	32737.5
Moda	33358.5
Desvio padrão	1357.71
Variância	1.84E+06

Fonte: elaborado pelo autor

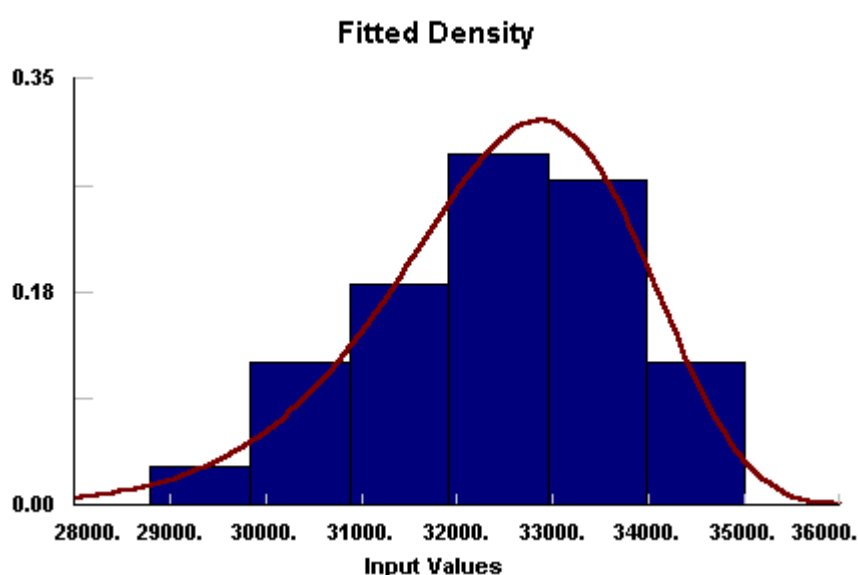


Figura 4.2.2.1.1 – Variação da demanda por energia excetuando o Forno Panela.

Fonte: elaborado pelo autor

Diferença entre temperatura de saída e temperatura de entrada – Forno Panela

Os dados de diferença de temperatura foram coletados na unidade °C.

Tabela 4.2.2.1.2 – Informações sobre Diferença entre temperaturas de saída e de entrada para Forno Panela

Estatística descritiva	Produtos ã-VD	Produtos VD
Mínimo	-45	-15
Máximo	70	111
Média	0.682779	62.7778
Mediana	-1	58.5
Moda	-16	48
Desvio padrão	19.8526	35.4228
Variância	394.126	1254.77

Fonte: elaborado pelo autor

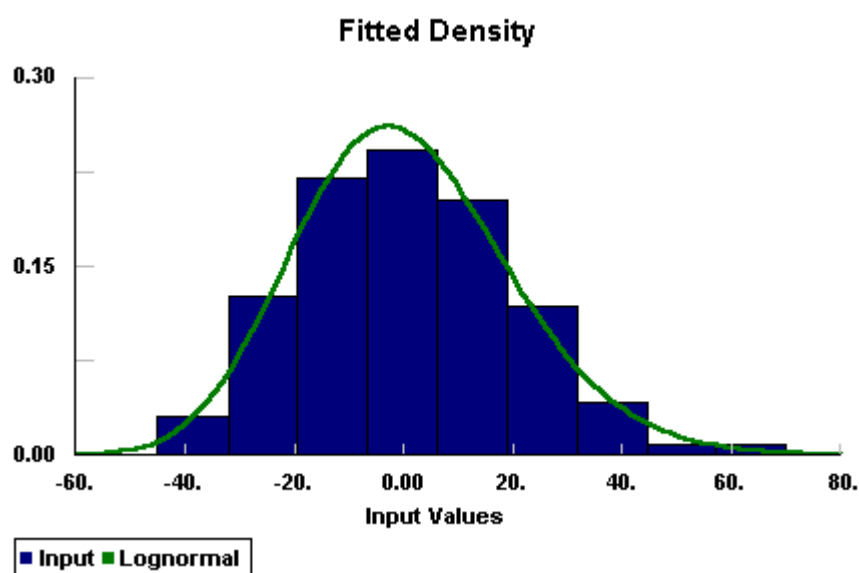


Figura 4.2.2.1.2 – Diferença entre temperaturas de entrada e de saída para produtos não-VD – Forno Panela. Fonte: elaborado pelo autor

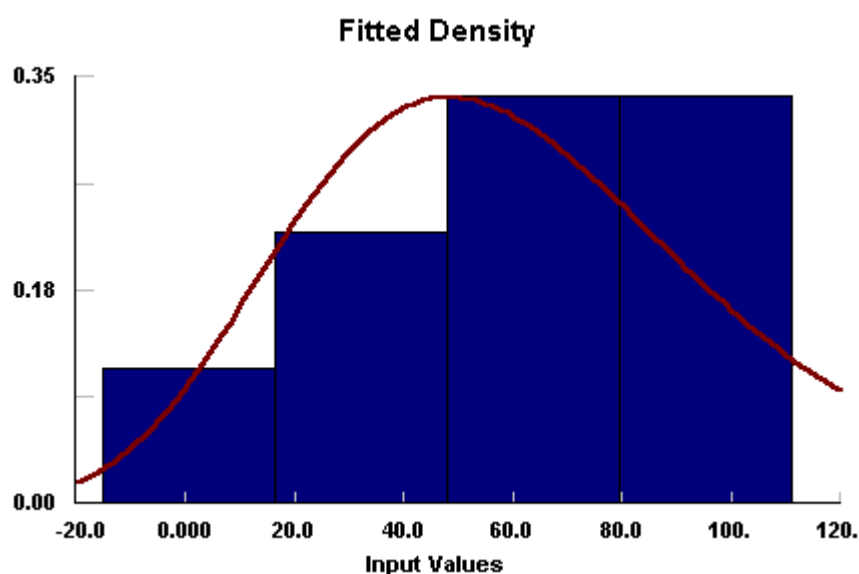


Figura 4.2.2.1.3 – Diferença entre temperaturas de entrada e de saída para produtos VD – Forno Panela. Fonte: elaborado pelo autor

Perda de temperatura do material no Forno Panela

Os dados sobre perda de temperatura foram obtidos através de cálculos. Foi fornecida a composição das ligas em cada panela considerada. Com uma tabela de contribuição térmica fornecida pela VMB, que informa a perda de temperatura a que corresponde uma certa quantidade de material para formação de liga, calculou-se quanto de temperatura cada panela considerada perde em função desta adição de material.

Tabela 4.2.2.1.3 – Informações sobre perda de temperatura por adição de material

Estatística descritiva	
Mínimo	-0.438
Máximo	-2.18E-02
Média	-0.145785
Mediana	-0.1445
Moda	-0.14485
Desvio padrão	4.06E-02
Variância	1.65E-03

Fonte: elaborado pelo autor

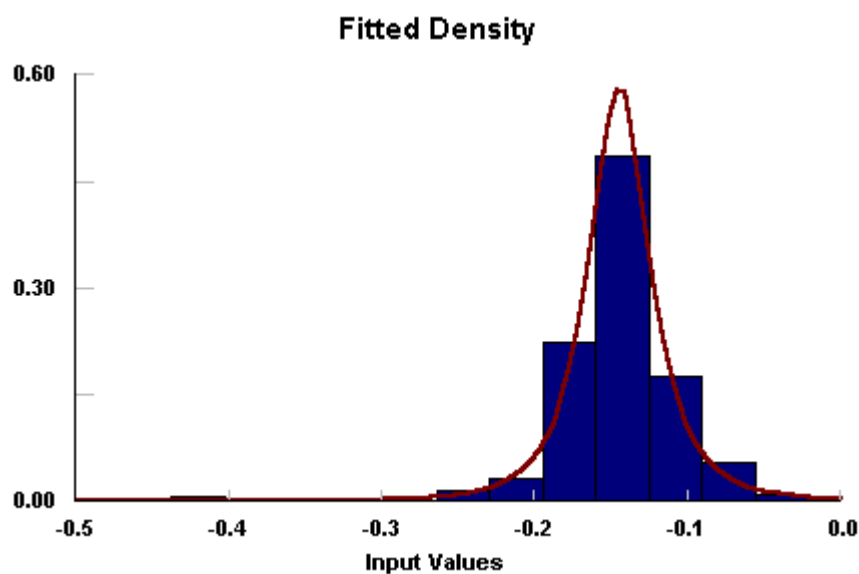


Figura 4.2.2.1.4 – Perda de temperatura por adição de material. Fonte: elaborado pelo autor

Pode-se constatar que os valores de perda de temperatura são da ordem de décimos de grau centígrado. Por ser pouco representativa na escala de precisão do modelo, esta perda de temperatura será considerada desprezível.

Taxa de aquecimento do Forno Panela e relação com potência consumida

A taxa de aquecimento do Forno Panela e sua relação com a potência constam na tabela abaixo:

Tabela 4.2.2.1.4 – Taxas de aquecimento do Forno Panela e relação com potência consumida

Potência (kW)	Taxa de aquecimento (°C/min)
7040	3.5

Fonte: dados passados pela VMB

Tempo de Lingotamento

O tempo de lingotamento foi coletado para cada panela da “corrida” considerada representativa pela VMB e pelo autor. A unidade utilizada para as medições é o minuto.

Tabela 4.2.2.1.5 – Informações sobre tempo de lingotamento para panelas

Estatística descritiva	Produtos ñ-VD	Produtos VD
Mínimo	31.08	39.3
Máximo	104.95	62.27
Média	42.8507	50.766
Mediana	41.48	49.815
Moda	37.65	56.11
Desvio padrão	7.47094	6.41586
Variância	55.815	41.1632

Fonte: elaborado pelo autor

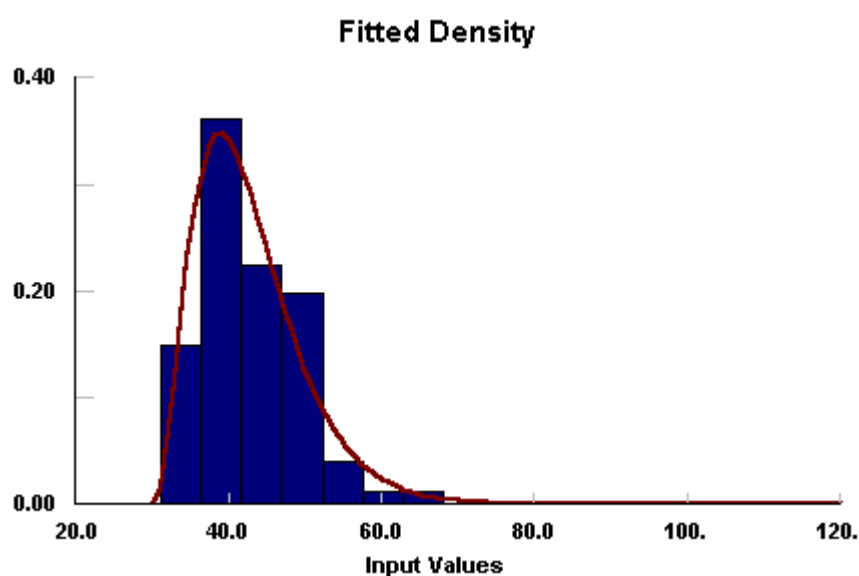


Figura 4.2.2.1.5 – Tempo de Lingotamento para produtos não-VD. Fonte: elaborado pelo autor

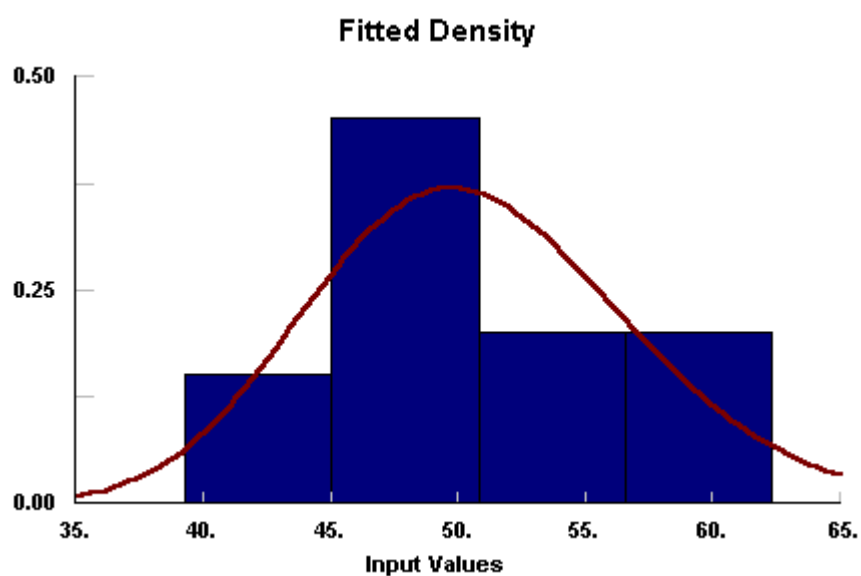


Figura 4.2.2.1.6 – Tempo de Lingotamento para produtos VD. Fonte: elaborado pelo autor

Limites de demanda contratados

O contrato com a CEMIG estabelece o seguinte:

Tabela 4.2.2.1.6 – Limites de demanda contratados

Período do dia	Demanda contratada (kW)
Horário de Ponta (18h às 21h)	40000
Horário Fora de Ponta (demais horários)	42000

Fonte: dados passados pela VMB

Tempo de aquecimento inicial

Tabela 4.2.2.1.7 – Informações sobre tempo de aquecimento inicial

Estatística descritiva	
Mínimo	5.54963
Máximo	12.316
Média	8.54052
Mediana	8.61442
Moda	8.9139
Desvio padrão	1.53859
Variância	2.36725

Fonte: elaborado pelo autor

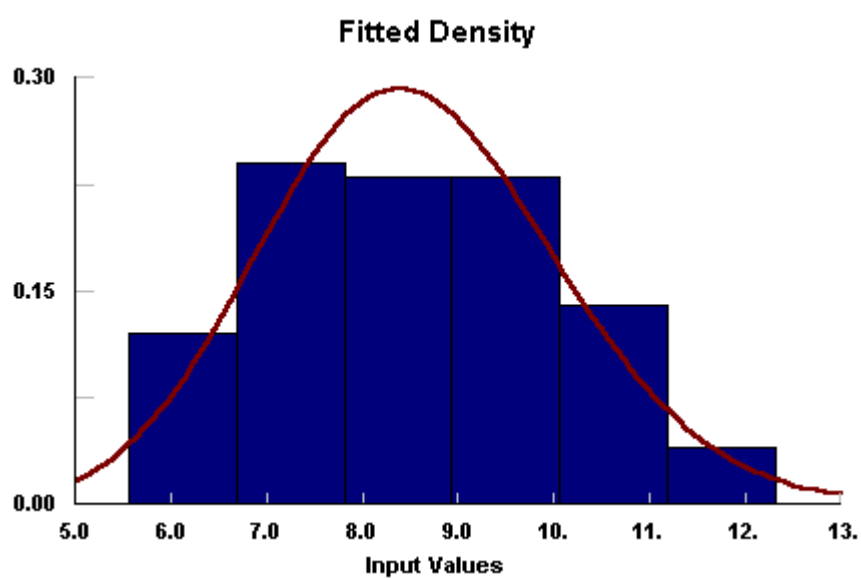


Figura 4.2.2.1.7 – Tempo de aquecimento inicial. Fonte: elaborado pelo autor

Tempo para coleta de amostras e para medição de temperatura

Tabela 4.2.2.1.8 – Informações sobre tempo para coleta de amostras e medição de temperatura

Estatística descritiva	
Mínimo	1.6129
Máximo	3.14443
Média	2.36986
Mediana	2.42001
Moda	2.47862
Desvio padrão	0.348509
Variância	0.121459

Fonte: elaborado pelo autor

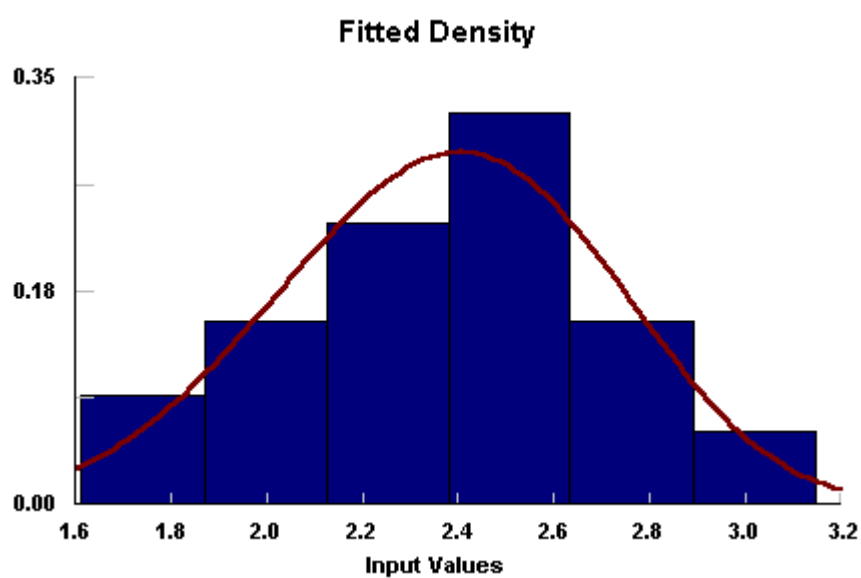


Figura 4.2.2.1.8 – Tempo para coleta de amostras e medição de temperatura. Fonte: elaborado pelo autor

Tempo para injeção de ligas, coleta de amostras e medição de temperatura

Tabela 4.2.2.1.9 – Informações sobre tempo para injeção de ligas, coleta de amostras e medição de temperatura

Estatística descritiva	
Mínimo	2.65738
Máximo	5.97596
Média	4.25363
Mediana	4.25754
Moda	3.95931
Desvio padrão	0.756793
Variância	0.572736

Fonte: elaborado pelo autor

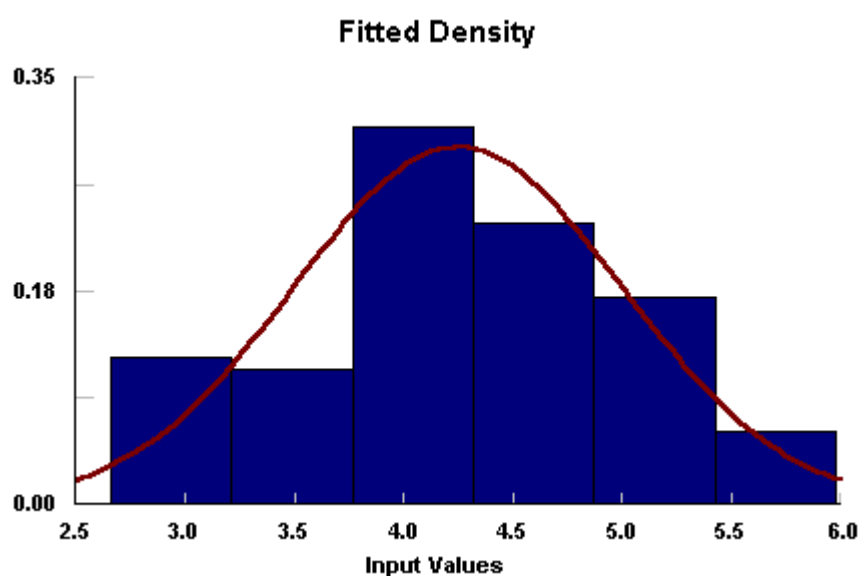


Figura 4.2.2.1.9 – Tempo para injeção de material, coleta de amostras e medição de temperatura. Fonte: elaborado pelo autor

4.2.3 Passo 3: Construção do modelo

4.2.3.1 Escolha do software de simulação

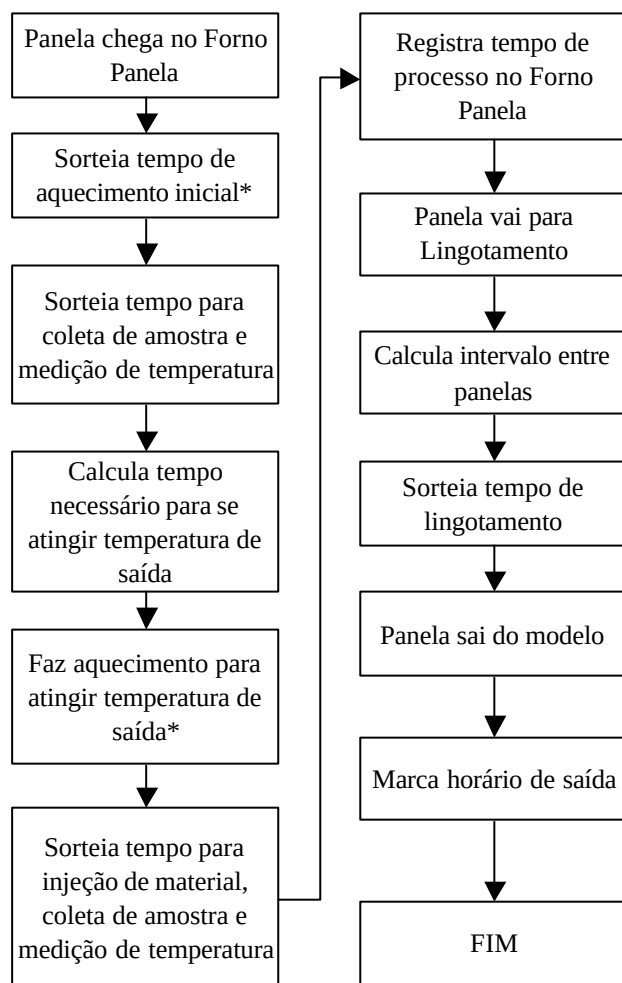
A ferramenta de simulação escolhida para construção do modelo é o software ProModel. Existem diversos fatores que levaram à escolha deste software:

- Tem os recursos necessários para a construção do modelo;
- Foi o simulador escolhido pelo Departamento de Engenharia de Produção da USP em avaliação das ferramentas de simulação do mercado;
- Como consequência da escolha do Departamento de Engenharia de Produção da USP, é o simulador com o qual os alunos tiveram contato durante o curso de graduação;
- Finalmente, é o simulador que a empresa Belge Engenharia representa no Brasil. Além de ser a ferramenta que o autor conhece com bastante profundidade (conhecimento oriundo da experiência no estágio), o projeto necessariamente teria de ser desenvolvido no simulador ProModel para que a empresa Belge Engenharia se interessasse pelo estudo.

4.2.3.2 Descrição sucinta do modelo

Como definido na especificação da simulação, o modelo desenvolvido representa as atividades realizadas desde a entrada das panelas no Forno Panela até que as mesmas terminem a etapa de Lingotamento Contínuo (ver Figura 1.4.1 – Fluxograma de produção da VMB). Os dados descritos anteriormente foram tratados no software de tratamento estatístico Stat::Fit, que vem incorporado ao simulador ProModel. Desta forma, pode-se utilizar distribuições estatísticas para representar a variabilidade dos tempos, demandas por energia, etc.

O fluxograma a seguir representa o funcionamento básico do modelo:



*estas atividades estão sujeitas à atuação do sistema de monitoramento de consumo de potência

Figura 4.2.3.2.1 – Fluxograma de funcionamento básico do modelo. Fonte: elaborado pelo autor

A principal complicação da construção do modelo foi simular o funcionamento do sistema de monitoramento da potência consumida na usina. Este deve interromper o funcionamento do Forno Panela caso haja previsão de que o limite de potência contratado será ultrapassado. Este sistema foi modelado como uma subrotina independente dos acontecimentos do modelo, descrita pelo fluxograma abaixo:

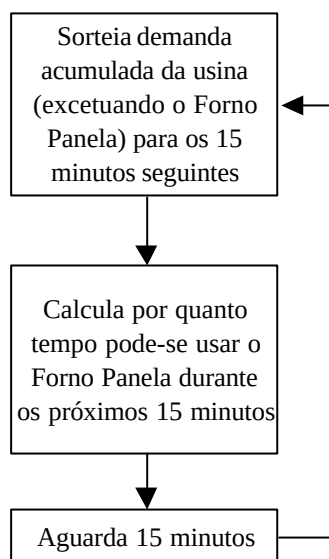


Figura 4.2.3.2.2 – Fluxograma de funcionamento do sistema de monitoramento.

Fonte: elaborado pelo autor

Como pode ser visto no fluxograma anterior, esta lógica não tem fim. Ela é executada continuamente, enquanto a simulação estiver sendo executada.

A idéia básica por trás da modelagem do sistema controlador é a seguinte: a lógica de controle do sistema de monitoramento armazena em uma variável o tempo disponível do Forno Panela para os próximos quinze minutos. Quando as atividades que precisam do Forno Panela ligado estiverem sendo executadas, o modelo diminui o valor daquela variável à medida em que o Forno Panela for utilizado. Isto é avaliado segundo a segundo. Se o tempo disponível do Forno Panela chegar a zero, a atividade que necessita do Forno Panela é suspensa temporariamente, até que se chegue ao final do intervalo de quinze minutos. Nesta ocasião, a lógica do sistema de monitoramento vai agir novamente, calculando um novo tempo de uso do Forno Panela para os quinze minutos seguintes.

Pode-se ver a seguir uma imagem do modelo desenvolvido no simulador ProModel:

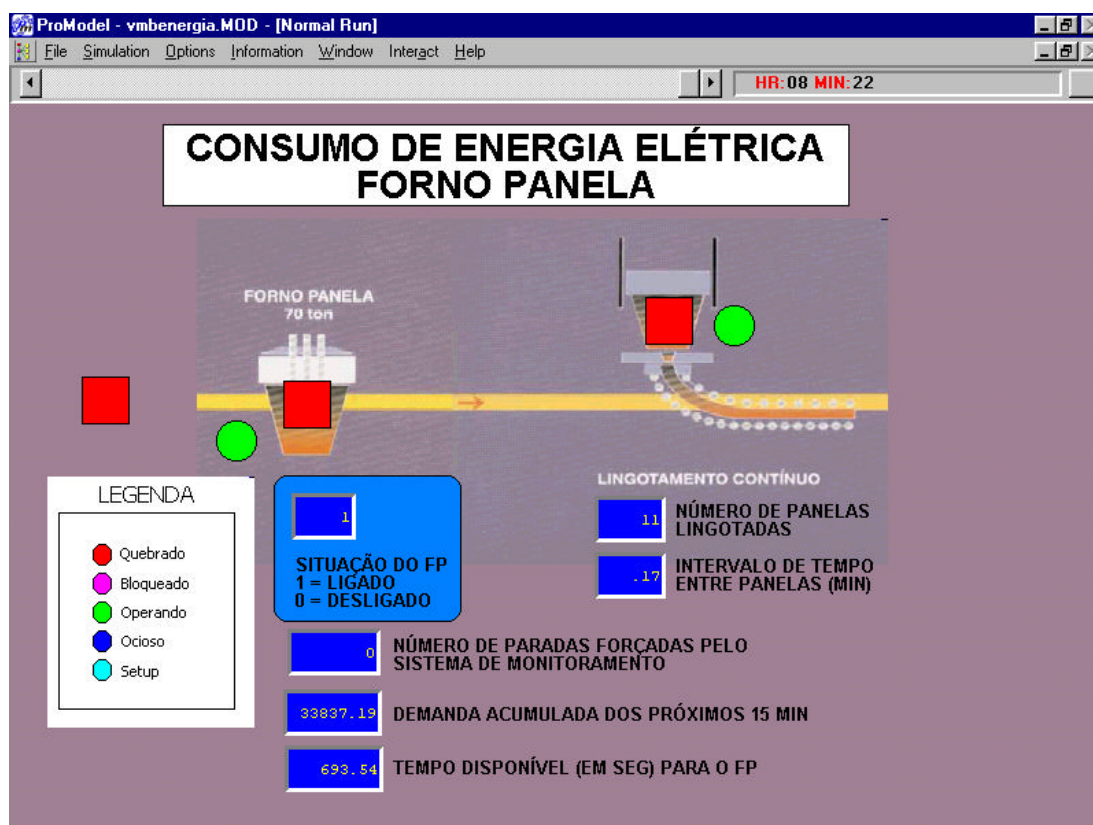


Figura 4.2.3.2.3 – Imagem do modelo desenvolvido em ProModel. Fonte: elaborado pelo autor

A listagem básica (código de programação) do modelo desenvolvido pode ser vista no Anexo B – Listagem básica do modelo em ProModel.

4.2.3.3 Validação do Modelo

Para validar o modelo, a primeira das verificações feitas foi o fluxo de painéis no modelo. A animação gráfica auxiliou neste processo.

Outras informações relevantes para a validação do modelo podem ser visualizadas durante a simulação, em contadores posicionados no *layout*. Estes indicam, entre outros valores, a demanda acumulada e o tempo de Forno Panela disponível para os próximos quinze minutos (valores que se mostraram condizentes com os dados passados pela VMB).

Finalmente, foi implementada uma lógica para cálculo do tempo de ciclo das painéis no Forno Panela. Os dados coletados durante a simulação com os ajustes

utilizados pela empresa (potência contratada atualmente) fornece valores que podem ser comparados a um dado extra coletado: o tempo de ciclo real do Forno Panela:

Tabela 4.2.3.3.1 – Comparação entre tempo de ciclo real e simulado

	Produto	Tempo de ciclo – Forno Panela		
		Média	Máximo	Mínimo
Real	Não-VD	15.8	32.1	9.8
	VD	31.2	74.5	10.9
Simulado	Não-VD	16.1	30.77	11.27
	VD	32.99	73.79	12.36

Fonte: elaborado pelo autor

Como pode ser constatado na tabela acima, os valores simulados se mostram bem próximos aos reais. Esta é a principal informação para validação do modelo, já que ele foca as atividades do Forno Panela.

Estas informações foram apresentadas aos profissionais da VMB, que as consideram adequadas e representativas.

Levando em conta as evidências mostradas acima, pode-se considerar o modelo validado e partir-se para a etapa de experimentação.

4.2.4 Passo 4: Experimentação

Seguindo a especificação da simulação, testaram-se diversos valores de potência contratada para produtos VD e para produtos não-VD.

Os indicadores chave na análise serão o número de paradas do Forno Panela forçadas pelo sistema de monitoramento de consumo de potência e o intervalo entre entradas de panelas no Lingotamento Contínuo. Este último indicador é o mais crítico.

Os resultados dos testes são apresentados a seguir. Eles referem-se a 100 horas de simulação.

Produtos não-VD

Tabela 4.2.4.1 – Resultados dos experimentos para produtos não-VD

Produto não-VD	Número de paradas forçadas pelo sistema de monitoramento	Intervalo entre painéis no LC (min)		
Potência contratada (kW)		Média	Mínimo	Máximo
42000	0	0	0	0
41000	0	0	0	0
40000	9	0	0	0
39000	34	0.15	0	1.5
38000	158	0.31	0	5.45

Fonte: elaborado pelo autor

Produtos VD

Tabela 4.2.4.2 – Resultados dos experimentos para produtos VD

Produto VD	Número de paradas forçadas pelo sistema de monitoramento	Intervalo entre painéis no LC (min)		
Potência contratada (kW)		Média	Mínimo	Máximo
42000	0	0	0	0
41000	6	0	0	0.1
40000	42	0.1	0	8.82
39000	98	0.27	0	13.18
38000	166	0.8	0	12.41

Fonte: elaborado pelo autor

Os dados apresentados acima são os mais importantes para a análise. Entretanto, ao rodar cada cenário, foram analisados diversos outros gráficos. Como exemplo de uma rodada, podem ser vistos alguns destes gráficos abaixo:

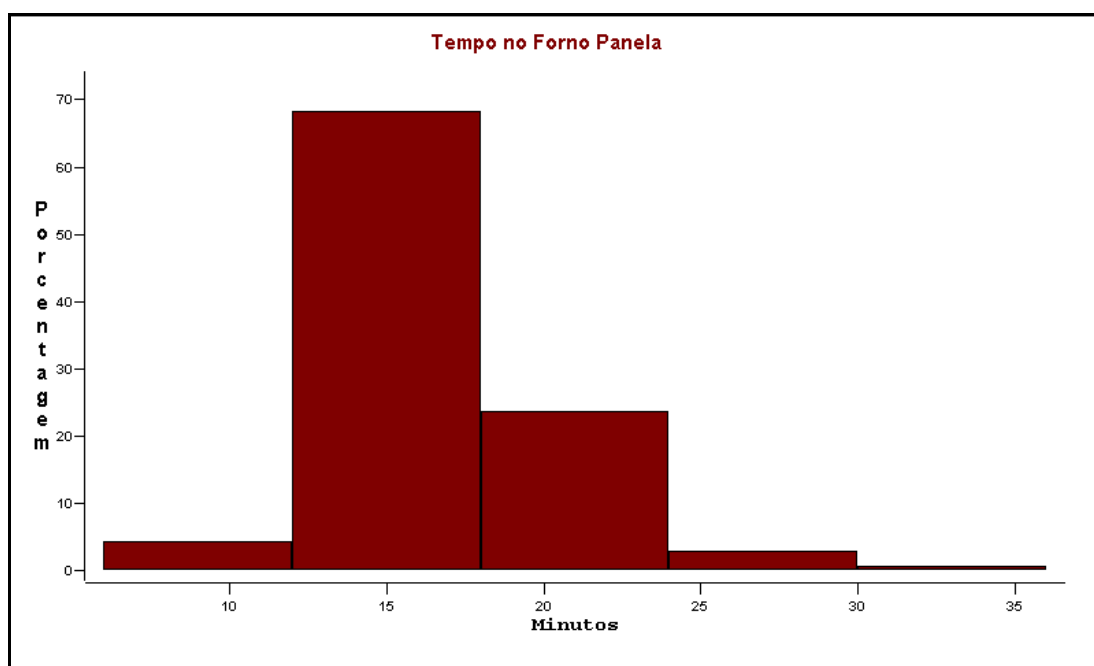


Figura 4.2.4.1 – Histograma para tempo no Forno Panela. Fonte: elaborado pelo autor

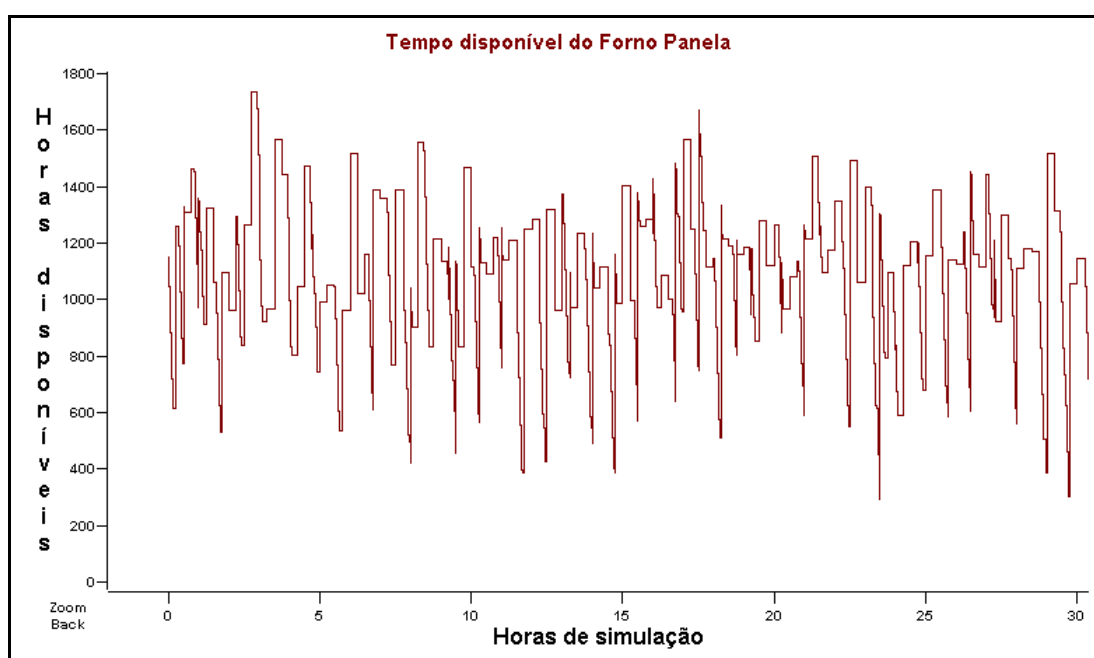


Figura 4.2.4.2 – Evolução das horas disponíveis do Forno Panela ao longo da simulação. Fonte: elaborado pelo autor

4.2.5 Passo 5: Análise dos *outputs*

A análise das tabelas 4.2.4.1 e 4.2.4.2 mostram que os produtos VD e não-VD requerem níveis diferentes de potência.

Para se trabalhar com produtos não-VD, é aceitável trabalhar com 39000kW de potência contratada, pois o maior intervalo entre panelas no Lingotamento Contínuo foi de 1.5 minuto.

Produtos VD exigem potência contratada maior: 41000kW, o que fornece um atraso de no máximo 0.1 minuto.

É necessário ressaltar que a avaliação de qual nível de potência escolher não está vinculada diretamente à ausência de intervalo entre panelas. Deve-se ter em mente as recomendações feitas na metodologia a respeito do ceticismo face aos resultados. Desta forma, a melhor interpretação para os números apresentados nas tabelas não é dada pelos números puros, mas por uma faixa de valores aceitável.

Voltando às matrizes 4.2.4.1 e 4.2.4.2, é aceitável trabalhar com intervalos da ordem de 1.5 minuto porque o Lingotamento Contínuo apresenta alguma flexibilidade no sistema real. Caso aconteça algum atraso de poucos minutos, é possível diminuir a velocidade de lingotamento momentaneamente para compensar uma eventual falta de material. Entretanto, não é possível manter esta situação por mais de 2 ou 3 minutos.

Por este motivo, definiu-se que a faixa aceitável para produtos VD é de 0.1 minuto: a faixa imediatamente inferior (potência de 40000kW, ou seja, 1000kW a menos) apresenta intervalo máximo de 8 minutos. Apesar da média ser quase nula, uma situação em que ocorra atraso de 8 minutos não pode acontecer para evitar grandes problemas no equipamento: perda de setup ou então endurecimento de metal dentro do equipamento, em caso de diminuição da velocidade do lingotamento.

4.2.6 Passo 6: Informação de resultados

A informação dos resultados será feita através deste relatório juntamente com apresentação junto à V&M do Brasil.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1 Síntese

Este trabalho teve como objetivo determinar os menores níveis de potência contratada para operação do Forno Panela sem prejuízos para a produção como um todo. Entenda-se prejuízo para a produção como falta de material no Lingotamento Contínuo.

Seguindo a metodologia apresentada, conduziu-se um projeto de simulação que forneceu as seguintes diretrizes:

Tabela 5.1.1 – Principais resultados da simulação

Tipo de produto	Potência mínima a contratar (kW)	Intervalo máximo previsto para chegada de painéis no Lingotamento Contínuo (minutos)
Não-VD	39000	1.5
VD	41000	0.1

Fonte: elaborado pelo autor

5.2 Sugestões

Atualmente, a empresa tem contratados 40000kW para horário de ponta e 42000kW para horário fora de ponta.

Uma recomendação que poderia ser feita é a produção preferencial de produtos não-VD durante o horário de ponta. Desta forma, poderia-se reduzir a demanda contratada do período de 40000kW para 39000kW. Vale lembrar que é no horário de ponta em que a energia custa mais caro.

Entretanto, produzir somente produtos não-VD durante o horário de ponta deve levar em conta outros fatores que não fizeram parte do estudo: seqüenciamento da produção, programação de pedidos, questões técnicas como capacidade do processo VD, etc.

De qualquer forma, as respostas fornecidas pela simulação constituem informações difíceis de se quantificar através de outros tipos de estudo. Tais informações serão valiosas para a V&M do Brasil para a definição de estratégias e programação da produção.

A determinação dos limites de potência a serem contratados não visa primordialmente a diminuição de tais limites; mas sim a melhor quantificação das necessidades da usina para que o ganho se reflita na diminuição das multas por excesso de demanda. Mesmo que o limite contratado venha a aumentar.

5.3 Projetos Futuros

Como desdobramento deste projeto, podem ser desenvolvidos outros tipos de modelos para dar continuidade ao estudo da questão energética na V&M do Brasil.

Uma alternativa seria modelar mais etapas do processo produtivo, incluindo outras opções de desligamento de equipamentos e suas eventuais consequências.

Outro projeto que poderia ser desenvolvido com a preocupação energética seria o melhor balanceamento da produção de forma a suavizar o consumo de energia e evitar picos. Isto envolveria a programação da produção diretamente.

BIBLIOGRAFIA

HARREL, C.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. **Simulation Using ProModel**. Orem, McGraw-Hill, 2000.

BATEMAN, R. E. et al. **System Improvement Using Simulation**. Utah, PROMODEL CORPORATION, 1997.

SHANNON, R. E. **Systems Simulation: The Art and Science**. Prentice-Hall, 1975.

GORDON, G. **System Simulation**, 2nd ed. Prentice-Hall, 1978.

DA SILVA, E. M. et al. **Pesquisa Operacional**. São Paulo, Atlas, 1995

PROMODEL CORPORATION INC. **ProModel User's Guide**. ProModel Corporation INC: Orem, 2002

ANEXOS

Anexo A: Estudo de caso apresentado na Winter Simulation Conference

Anexo B – Listagem básica do modelo em ProModel

```
*****
*
*                               Formatted Listing of Model:
*      C:\Meus documentos\Rafael\Poli\PRO\PRO2902\modelo\vmenergia.MOD
*
*****
```

```
Time Units:           Minutes
Distance Units:       Meters
Initialization Logic:  activate sub_controlador
```

```
*****
*                               Locations
*****
```

Name	Cap	Units	Stats	Rules	Cost
Entrada	3	1	Time Series Oldest,		
Forno_Panela	1	1	Time Series Oldest,		
Lingotamento_Contínuo	1	1	Time Series Oldest,		

```
*****
*                               Entities
*****
```

Name	Speed (mpm)	Stats	Cost
Batelada	50	Time Series	

```
*****
*                               Processing
*****
```

Process

Routing

Entity	Location	Operation	Blk	Output	Destination
Rule	Move Logic				
Batelada	Entrada		1	Batelada	Forno_Panela
FIRST 1	move for 10 sec				
Batelada	Forno_Panela	a_ini_panela = clock(min)			
		//aquecimento inicial			
		sub_liga_FP(60*T(6,8,12))			

```

//tempo desligado para coleta de temperatura e
análise química
wait T(2,2.5,3) min

//aquecimento para atingir delta de temp. necessário
int delta_t
int t_aquec

if produto_VD = 0 then delta_t = -173+L(173, 19.8)
//°C
if produto_VD = 1 then delta_t = -154+P5(30.,
6.29e+003) //°C

if delta_t > 0 then
{
if TAP = 2 then t_aquec = (delta_t/3.5)*60 //sec
if TAP = 4 then t_aquec = (delta_t/2.5)*60 //sec
sub_liga_FP(t_aquec)
}

//sub_liga_FP(60*T(6, 10, 20))

//liberação da panela - amostras, injeção de ligas
wait T(2,2.5,3) min

LOG "Tempo no Forno Panela", a_ini_panela
1 Batelada
Lingotamento_Contínuo FIRST 1 //move for 10 sec
Batelada Lingotamento_Contínuo //registra tempo passado entre panelas
if v_horario_saida_panela <> 0 then
v_tempo_entre_panelas_no_lc = clock(min) -
v_horario_saida_panela

//tempo de lingotamento de uma panela
if produto_VD = 0 then wait 30.1+G(3.26, 4.05) min
if produto_VD = 1 then wait -8.32+IG(5.23e+003, 59.1)
min
1 Batelada EXIT
FIRST 1 INC v_nr_panelas_lingotadas
v_horario_saida_panela = clock(min)

```

```
*****
*                               Arrivals                               *
*****
```

Entity	Location	Qty	Each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
Batelada	Entrada	1	0		INF	20	

```
*****
*                               Attributes                               *
*****
```

ID	Type	Classification
a_ini_panella	Real	Entity

```
*****
*                               Variables (global)                       *
*****
```

ID	Type	Initial value	Stats
v_demanda_média_15_min	Real	0	Time Series
v_situacao_FP	Integer	0	Time Series
v_tempo_disp_FP	Real	0	Time Series
v_nr_paneles_lingotadas	Integer	0	Time Series
v_tempo_entre_paneles_no_lc	Real	0	Time Series
v_horario_saida_panella	Real	0	Time Series
v_nr_paradas	Integer	0	Time Series

```
*****
*                               Macros                                   *
*****
```

ID	Text
tap	2
demanda_contratada	42000
produto_VD	0

```
*****
*                               Subroutines                               *
*****
```

ID	Type	Parameter	Type	Logic
----	------	-----------	------	-------

```

-----
sub_controlador None                                //sorteia demanda da usina e
determina qto tempo de FP está disponível nos próximos 15 minutos

int pot_FP
if TAP = 2 then pot_FP =
7040 //kW
if TAP = 4 then pot_FP =
6760 //kW

volta:

//sorteia qual será a
demanda acumulada daqui a 15 minutos
v_demanda_média_15_min =
2.23e+004+W(8.84, 1.08e+004)

v_tempo_disp_FP =
60*15*(demanda_contratada - v_demanda_média_15_min)/pot_FP //em segundos

//após 15 minutos, refaz
sorteio e calcula qto tempo disponível de FP existe.
wait 15 min
goto volta
sub_liga_FP None tempo_de_uso Integer //liga o FP respeitando
limitação de tempo, para não estourar limite contratado

//parâmetro é o tempo de uso
em segundos.

while tempo_de_uso > 0 do
{
if v_tempo_disp_FP > 0 then
{
v_situacao_FP = 1
wait 1 sec
dec v_tempo_disp_FP
}
else
{
INC v_nr_paradas
wait until v_tempo_disp_FP > 0
v_situacao_FP = 0
}
}

```



```
}
```

```
dec tempo_de_uso  
}
```

```
v_situacao_FP = 0
```