

Simulação do processo de produção da vareta do elemento combustível nuclear de Angra 1

João Luís Aguiar de Abreu, joaofls@hotmail.com¹

¹Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rodovia Presidente Dutra km 298 (sentido RJ-SP) – Polo Industrial – Resende/ RJ – Cep:27.537-000

Resumo: Este trabalho tem o objetivo de simular o processo produtivo das varetas que compõem o elemento combustível nuclear, do tipo 16STD utilizado em Angra 1, fabricado nas Indústrias Nucleares do Brasil. As varetas combustíveis são componentes do elemento combustível e servem como suporte as pastilhas de dióxido de urânio, barreira contra a liberação de produtos de fissão e fazem parte do sistema que mantém a geometria crítica de forma que ao ser acionada no reator ocorra a fissão nuclear, sendo assim a vareta é um dos principais componentes de um elemento combustível. O processo produtivo é composto de etapas de soldagem, enchimento, testes e inspeções. Será realizada uma simulação computacional do processo produtivo da vareta utilizando o programa ProModelTM. Os tempos serão medidos em cada sub-processo e com a capacidade produtiva de cada um destes teremos a produtividade do processo, identificando deste modo o gargalo e apresentando possibilidades de otimização deste processo. Esta simulação tem como objetivo otimizar o aproveitamento das máquinas e operadores envolvidos no processo. Os sub-processos que serão modelados são: soldagem TIG, enchimento das varetas com pastilhas de dióxido de urânio (UO₂), inspeções dimensionais das varetas, acoplamento de sub-componente na vareta, enchimento de gás hélio, soldagem WPS, lavagem das varetas, teste de estanqueidade e armazenamento. Deste modo será apresentado o processo, a simulação, a identificação de dificuldades e gargalos no processo e serão elaboradas sugestões de melhorias.

Palavras-chave: Simulação, Vareta combustível, Otimização, Processo, ProModelTM

1. INTRODUÇÃO

O ProModelTM é uma ferramenta de tomada de decisão que pode modelar desde processos simples, até processos extremamente complexos. A produção de varetas combustíveis é um processo complexo e rigoroso o qual como todo o tipo de processo pode ser melhorado.

A vareta é o suporte mecânico do “coração” do combustível nuclear, que são as pastilhas de dióxido de urânio. Estas armazenam a energia tal que no final do processo é transformada em energia elétrica por meio de um gerador elétrico que é acionado por uma turbina, que por sua vez é acionada pelo vapor d’água gerado pelo gerador de vapor.

Após ser simulado o processo produtivo da vareta, serão identificados os gargalos, os percentuais de utilização de cada posto, o total de varetas produzidas em um determinado tempo, o total de varetas no sistema, isto é, será mostrada cada variável mensurável que influencia o processo. A partir do resultado destas variáveis serão propostas soluções plausíveis para a otimização do processo, isto é, produzir mais varetas em um menor tempo.

2. CONCEITOS

Antes de começarmos a explicar o modelo e a simulação gerada, vamos definir alguns conceitos.

2.1. Modelo

Segundo Seila [1995], um sistema é um conjunto de componentes ou entidades interagindo, isto é, os componentes trabalham juntos para atingir algum objetivo. Neste contexto, um modelo é uma abstração e representação simplificada do sistema. O modelo representa os componentes mais importantes do sistema e a forma como eles interagem. Um modelo estocástico é um modelo cujo comportamento não pode ser predito com valores fixos, mas que é sujeito a aleatoriedades.

A maioria dos modelos aproximados usa o paradigma do “entity-attribute-set” (conjunto de atributos da entidade), onde um sistema é considerado como sendo composto por entidades, as quais possuem atributos que são itens de informação a respeito da entidade.

2.2. Modelagem

Um modelo deve conter apenas os detalhes estritamente necessários para capturar a essência do sistema, dentro dos propósitos para o qual foi concebido, ou, em outras palavras, não se deve prender a detalhes desnecessários.

Para uma melhor modelagem, sugere-se a seguinte sequência de execução dos modelos:

- fazer uma análise do sistema a ser modelado e definir os objetivos que se quer alcançar com a simulação;
- definir o modelo;
- coletar os dados;
- construir, verificar e validar o modelo;
- analisar.

2.3. Simulação

De acordo com Seila [1995], o termo simulação é usualmente empregado para se referir à representação da dinâmica de um objeto ou sistema para análise de alguma atividade deste, considerada muito grande e/ou complexa.

Toda simulação se utiliza de um modelo para descrever o comportamento do objeto/sistema, que pode ou não existir e que é geralmente muito mais custoso e complexo que o modelo. A idéia chave é que a simulação é uma realização alternativa que se aproxima do objeto/sistema e em muitos casos o propósito da simulação é analisar e entender o comportamento deste em função de ações e decisões alternativas.

A simulação é uma metodologia que não é específica para uma área em particular de aplicação, pelo contrário, pode ser aplicada para qualquer objeto/sistema que possa ser devidamente modelado.

Ela possui vantagens sobre outras alternativas (como por exemplo: a análise matemática que é limitada a um certo número de objetos/sistemas cujo modelo matemático é conhecido). Como algumas de suas vantagens, pode-se citar: a capacidade de analisar modelos de complexidade arbitrária; a geração de resultados quantitativos e qualitativos para os responsáveis pela tomada de decisões; a flexibilidade do arranjo de métodos de simulação que pode ser usado para analisar sistemas estocásticos, etc.

Segundo Kelton [1995], a simulação de sistemas pode ser de dois modos: DIDO (entrada determinística – saída determinística: “deterministic input and output”) ou RIRO (entrada aleatória - saída aleatória: “random input and output”). Os sistemas que se comportam como o primeiro caso são chamados determinísticos e, não importa quantas vezes sejam simulados, os resultados serão sempre os mesmos. Já os que se assemelham ao segundo são chamados estocásticos e, quando simulados, fornecem uma “distribuição” de resultados onde se pode considerar um intervalo de confiança.

A simulação é a ferramenta adequada para se modelar um sistema no qual a variação estatística e a interdependência de seus elementos são tais que a programação linear e outros métodos de otimização não se mostram práticos ou aplicáveis.

3. ELEMENTO A SER MODELADO

3.1. A Vareta Combustível

Abaixo temos a Fig. (1) que mostra em detalhes a Vareta Combustível e seus respectivos componentes .

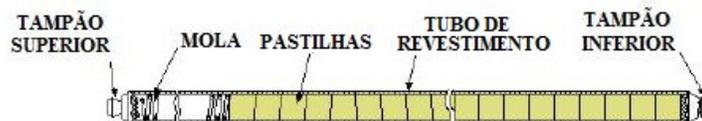


Figura 1: Vareta Combustível

Logo a seguir temos também o fluxograma de processo de produção da Vareta Combustível:

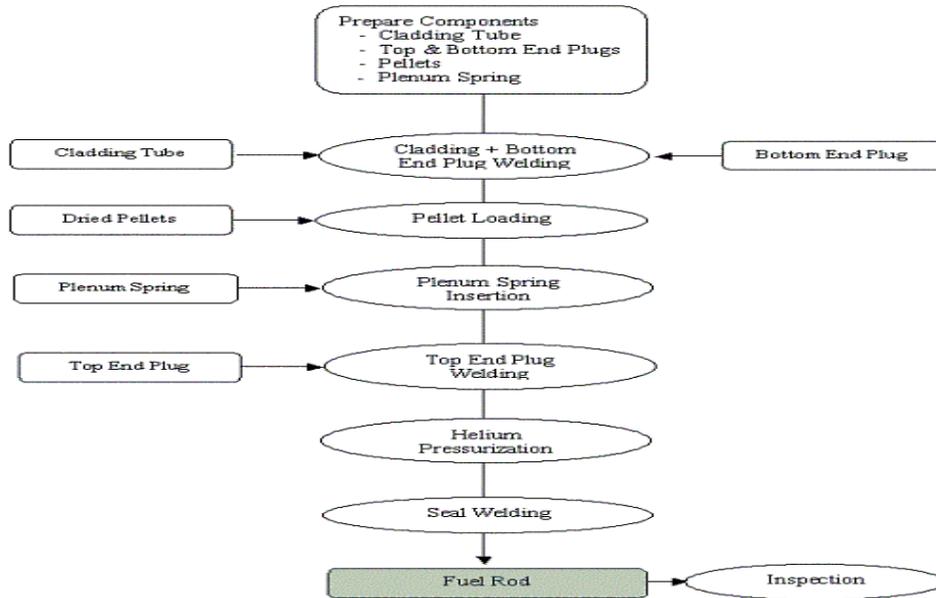


Figura 2: Fluxograma de Processo da Vareta Combustível

4. A SIMULAÇÃO DO PROCESSO EM PROMODEL™

Agora mostraremos a simulação feita em Promodel™. Primeiro os tubos de zircaloy™ são enviados para a primeira solda através de uma esteira que funciona como um “pulmão” para a produção. Logo depois o tubo soldado com o tampão é enviado para o enchimento, onde é enchido com as pastilhas de urânio (373 pastilhas/vareta). Logo é enviado para a segunda solda, onde é soldado, enchido com gás hélio e acoplada a mola automaticamente. Depois as varetas são lavadas uma a uma para retirada de algum resquício de urânio externo a ela e são agrupadas em um behalter (agrupa 235 varetas). De cada 200 varetas que passam peça lavagem uma vai para o teste de Raio-X. O penúltimo Posto é o teste de estanqueidade e por último armazenamento.

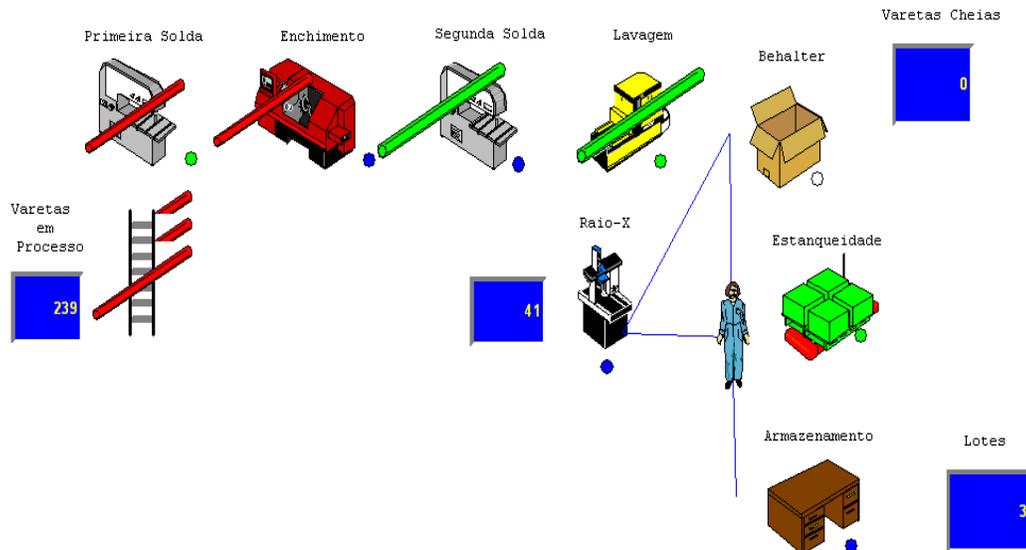


Figura 3: Processo Produtivo da Vareta Combustível

4.1. Os tempos e as distribuições estatísticas

Tabela 1. Tempos de cada posto em minutos.

1ª SOLDA	ENCHIMENTO	2ª SOLDA	LAVAGEM	BEHALTER	ESTANQUEIDADE	RAIO-X
2,1	1,8	1,5	1,4	0,9	10,2	3,6
1,9	1,9	1,3	1,3	1,0	9,3	2,5
2,2	1,8	1,5	1,4	1,0	8,5	4,8
2,2	1,9	1,4	1,5	1,1	11,2	2,9
2,3	2,1	1,2	1,3	0,8	8,3	3,1
2,0	1,7	1,4	1,5	0,9	10,6	3,8
1,9	1,9	1,5	1,2	0,7	8,2	2,7
2,0	2,0	1,4	1,5	1,0	11,3	4,0
2,1	2,1	1,3	1,4	0,9	9,9	3,3

As distribuições estatísticas são geradas automaticamente por um módulo do Promodel™ a partir dos tempos plotados.

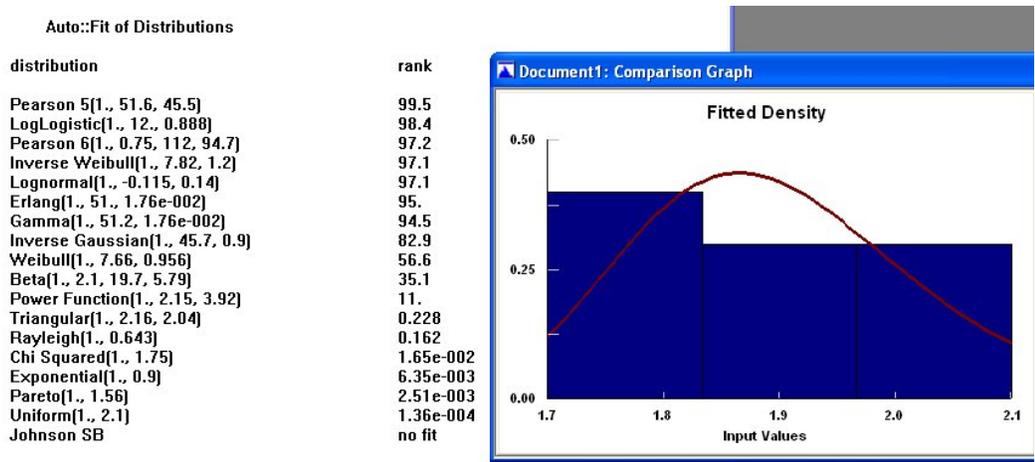


Figura 4: Distribuição da 1ª Solda

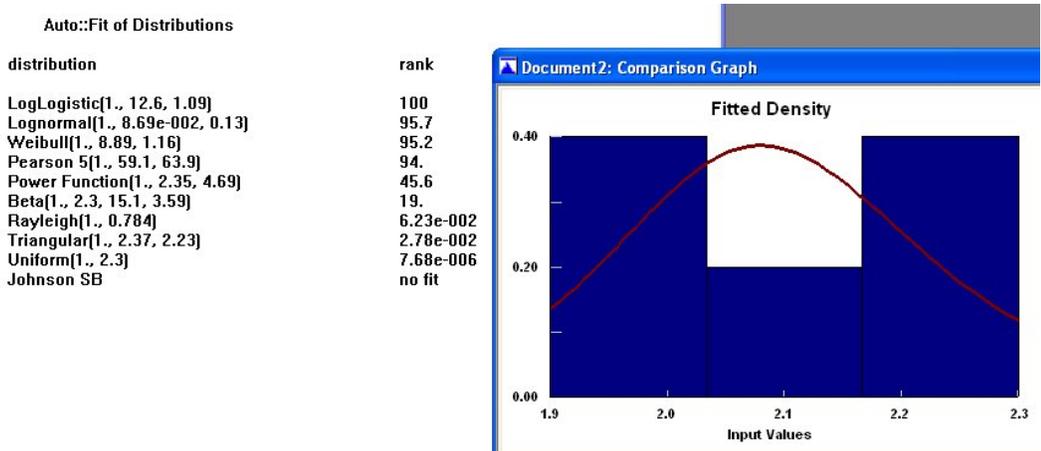


Figura 5: Distribuição do Enchimento

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank
LogLogistic[1., 6.18, 0.4]	93.8
Lognormal[1., -0.954, 0.288]	53.9
Weibull[1., 4.98, 0.438]	53.1
Pearson 5[1., 11.1, 4.1]	41.1
Power Function[1., 1.6, 2.26]	13.4
Rayleigh[1., 0.292]	9.18
Triangular[1., 1.57, 1.46]	6.46
Beta[1., 1.5, 6.78, 3.42]	0.657
Uniform[1., 1.5]	0.246
Johnson SB	no fit

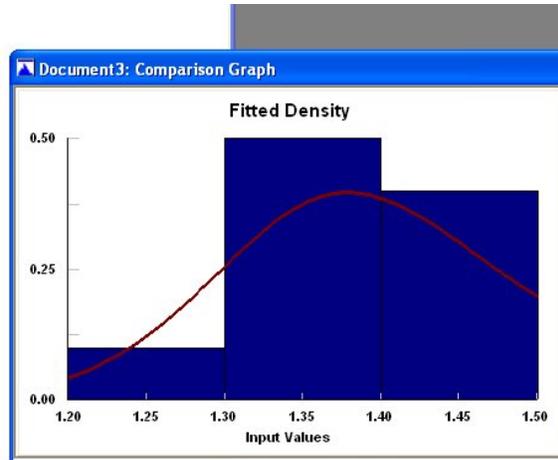


Figura 6: Distribuição da 2ª Solda

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank
Weibull[1., 5.04, 0.426]	100
LogLogistic[1., 6.55, 0.39]	77.
Lognormal[1., -0.976, 0.276]	43.2
Pearson 5[1., 12.2, 4.42]	32.8
Triangular[1., 1.57, 1.46]	17.1
Power Function[1., 1.6, 2.15]	14.
Rayleigh[1., 0.284]	7.14
Beta[1., 1.5, 7.31, 3.4]	1.01
Uniform[1., 1.5]	0.124
Johnson SB	no fit

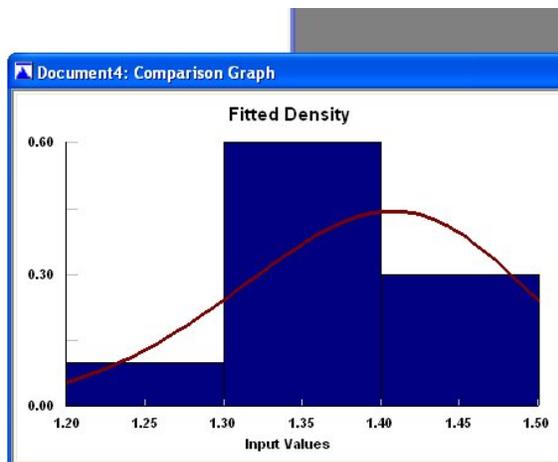


Figura 7: Distribuição da Lavagem

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank
Weibull[2., 2.38, 1.63]	100
Johnson SB[2., 3.98, 0.823, 1.29]	99.6
Triangular[2., 5.22, 2.97]	97.7
Rayleigh[2., 1.12]	97.1
Gamma[2., 4.57, 0.315]	95.7
Pearson 6[2., 1.6e+004, 4.58, 5.1e+004]	95.6
Erlang[2., 5., 0.288]	94.9
LogLogistic[2., 3.44, 1.33]	93.2
Lognormal[2., 0.251, 0.495]	87.9
Inverse Gaussian[2., 5.26, 1.44]	85.1
Pearson 5[2., 4.05, 4.58]	75.9
Inverse Weibull[2., 1.99, 1.01]	74.5
Beta[2., 4.8, 3.43, 4.05]	56.7
Uniform[2., 4.8]	36.2
Chi Squared[2., 2.18]	6.56
Exponential[2., 1.44]	6.19
Power Function[2., 5.71, 0.943]	3.59
Pareto[2., 1.91]	1.53

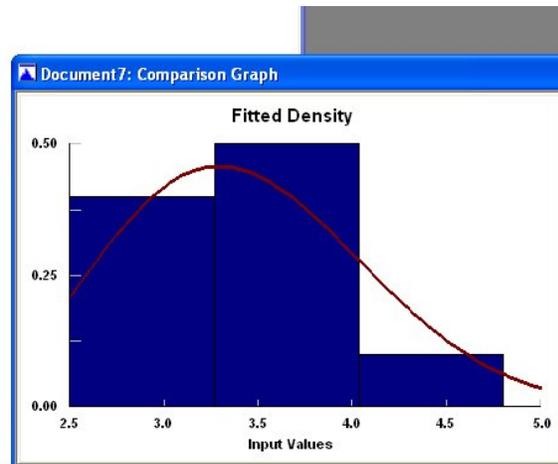


Figura 8: Distribuição do Raio-X

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank
Weibull[0., 8.47, 0.954]	100
LogLogistic[0., 11.6, 0.902]	78.9
Lognormal[0., -0.116, 0.146]	57.4
Pearson 5[0., 46.2, 40.7]	50.3
Beta[0., 1.1, 12.1, 3.07]	32.
Power Function[0., 1.15, 3.91]	10.9
Triangular[0., 1.16, 1.04]	0.418
Rayleigh[0., 0.643]	0.16
Uniform[0., 1.1]	4.32e-005
Johnson SB	no fit

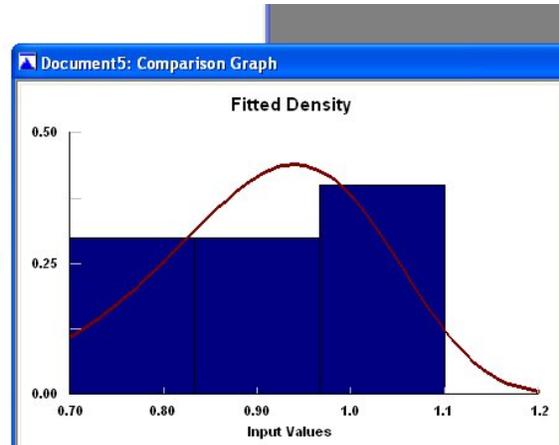


Figura 9: Distribuição do Behalter

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank
Beta[8., 11.3, 0.861, 0.845]	100
Uniform[8., 11.3]	82.5
Weibull[8., 1.47, 2.01]	48.3
LogLogistic[8., 1.73, 1.48]	43.2
Power Function[8., 11.3, 1.06]	35.9
Triangular[8., 12.7, 8.]	29.2
Lognormal[8., 0.253, 0.987]	25.2
Rayleigh[8., 1.52]	14.8
Pearson 5[8., 1.05, 0.779]	13.2
Johnson SB	no fit

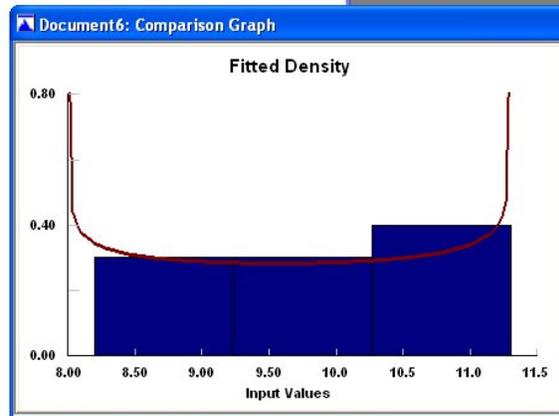


Figura 10: Distribuição da Estanqueidade

4.2. Resultados

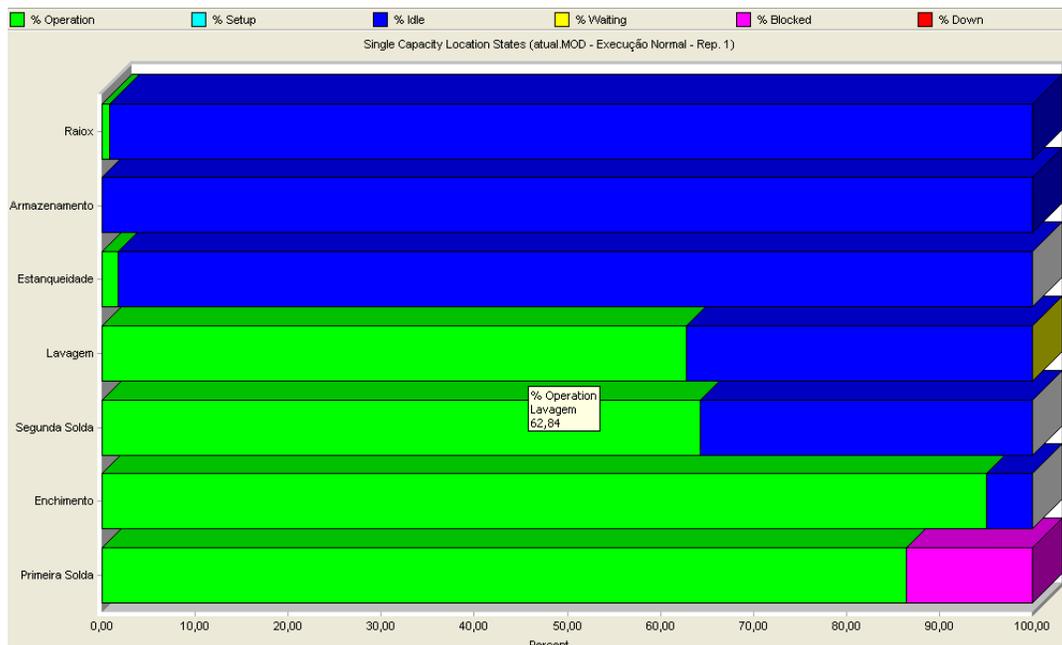


Figura 11: Resultado do Processo

Verificamos através da interpretação deste gráfico que a 1ª Solda está uma porcentagem considerável bloqueada. O total de produção foi de 5 lotes de varetas com 235 varetas cada lote. Desta forma verificamos que o gargalo é o enchimento pois ele é o que tem um maior percentual de operação, além de estar bloqueando a 1ª Solda. Fazendo-se a otimização do processo, isto é, acrescentando mais um enchimento ou aumentando sua capacidade, conseguiremos produzir um lote a mais, sendo um total de 6 lotes produzidos. Há também a diminuição considerável dos bloqueios e a aparente eliminação do gargalo, na verdade gargalo transfere-se para a 1ª Solda, mas não influencia negativamente de forma considerável o processo.

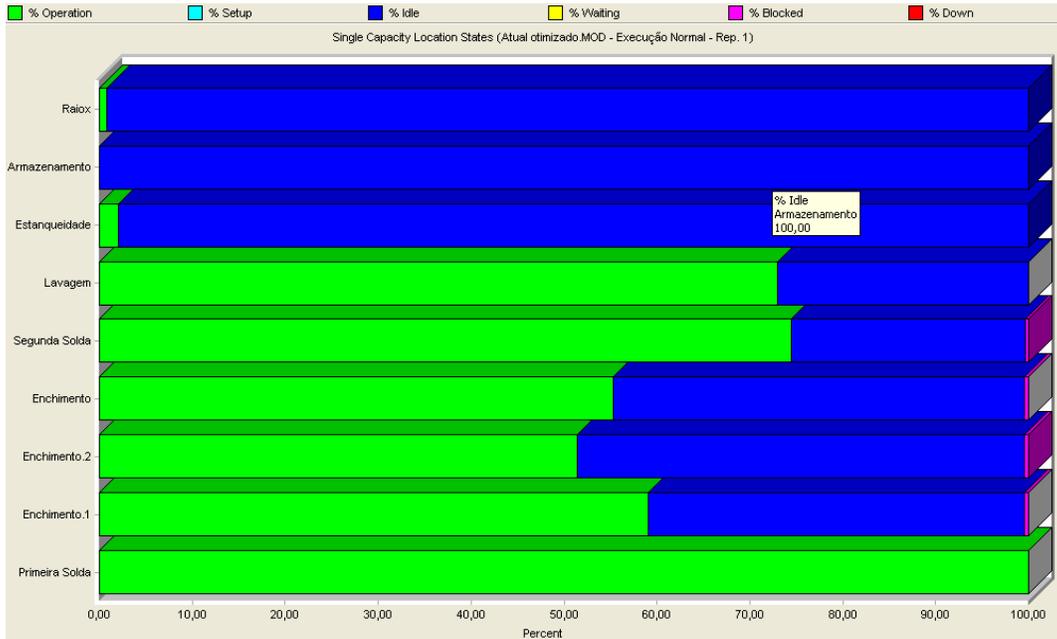


Figura 12: Resultado do Processo Otimizado

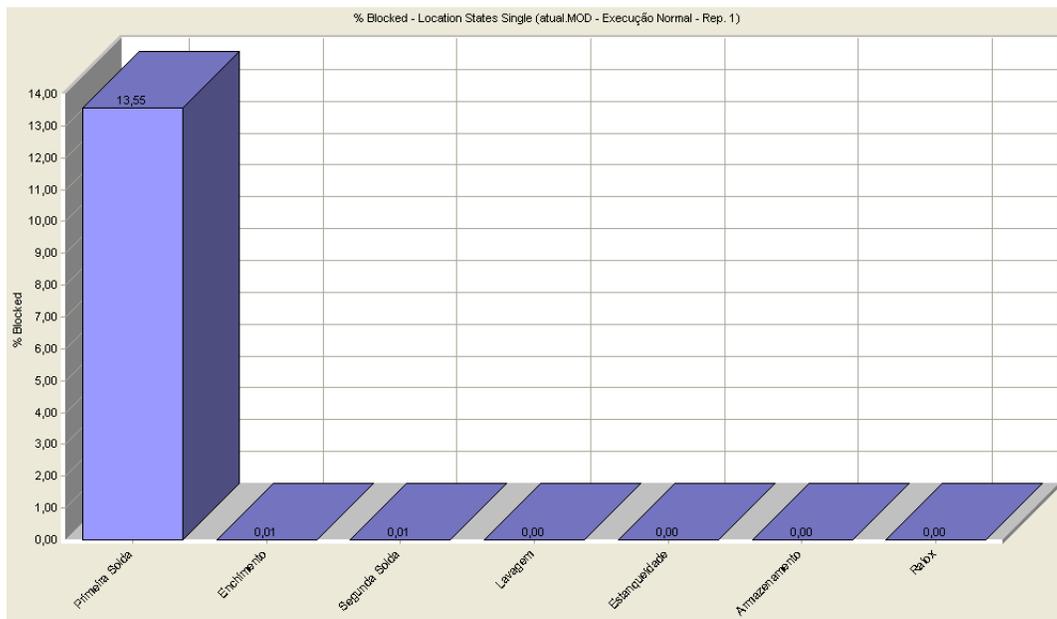


Figura 13: Porcentagem de bloqueio dos postos no sistema

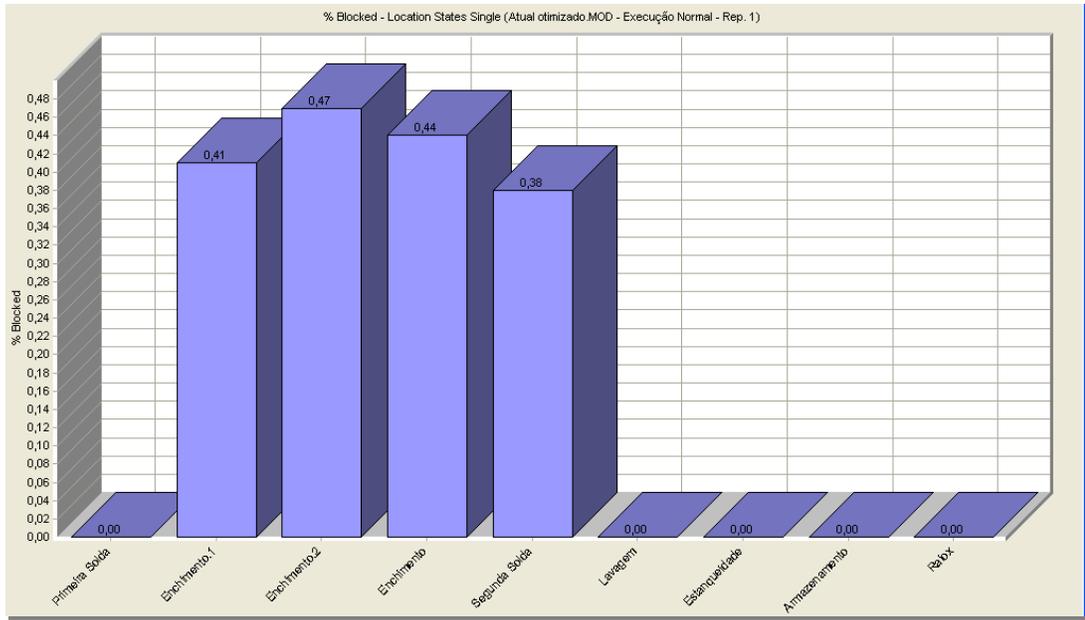


Figura 14: Porcentagem de bloqueio dos postos no sistema otimizado

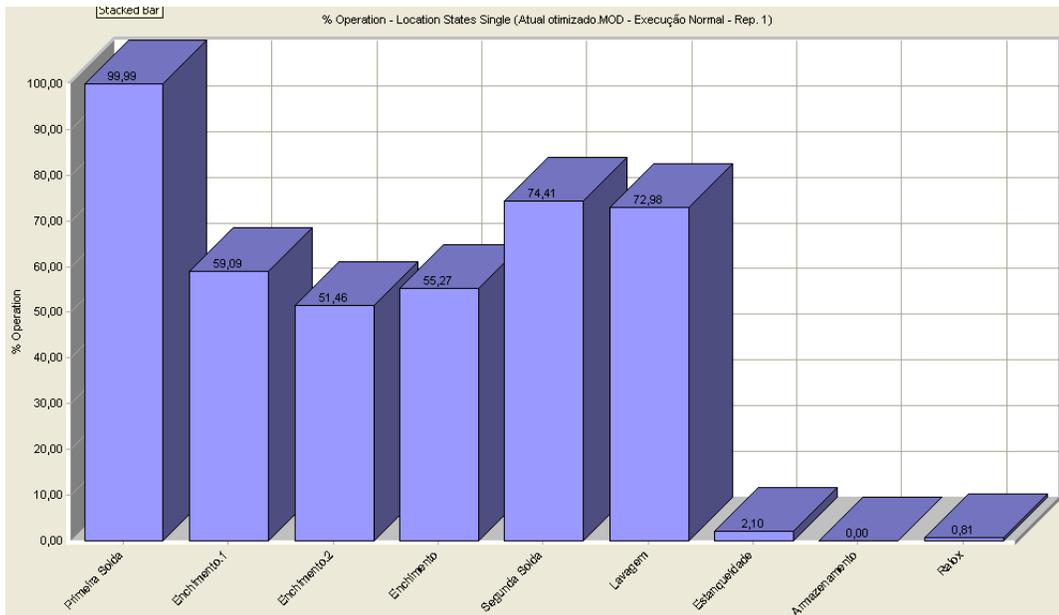


Figura 15: Porcentagem de operação dos postos no sistema

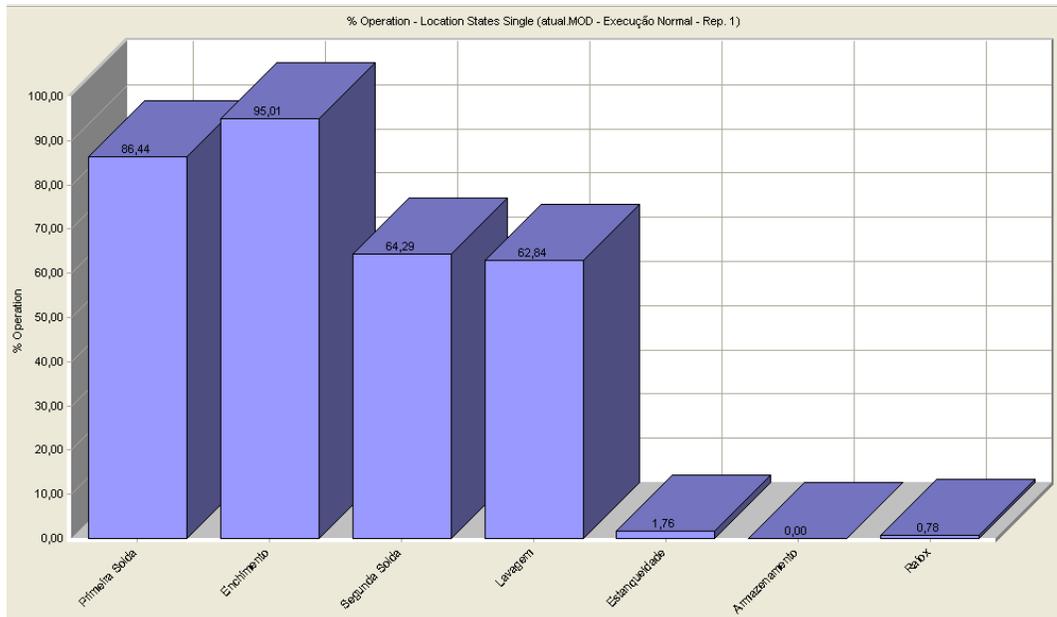


Figura 16: Porcentagem de operação dos postos no sistema otimizado

5. Conclusão

O processo possui um nítido gargalo que é o enchimento, esta nitidez dá-se pela utilização desta ferramenta de análise de processos que é o ProModelTM, tendo uma acuracidade de 80%. Os gráficos que mostram o bloqueio, isto é, Fig.(13) e Fig.(14) mostram uma relação de bloqueio de 1,94% em média para o sistema, e 0,24% de bloqueio em média para o sistema otimizado. Além de eliminar o gargalo foi aumentado o fluxo de produção. No modelo sem modificações, a produção de varetas é de 1175, totalizando 5 lotes, durante 48 horas de produção, e 130 varetas permanecem no sistema após o término da simulação. No sistema otimizado, isto é, com mais um local (posto), de enchimento, a produção de varetas é de 1410, totalizando 6 lotes, durante o mesmo tempo, e 104 varetas permanecem no sistema, logo produzimos um lote a mais. Esta é uma ferramenta de tomada de decisão e devemos utilizar outras ferramentas para verificar se devemos ou não investir na compra de uma outra máquina de enchimento de varetas; ferramentas da qualidade por exemplo. Não devemos tomar alguma decisão baseada apenas nesta ferramenta, temos outras ferramentas de tomada de decisão, e devemos usá-las. Em nosso caso devemos tomar a decisão de investir ou não na compra de uma nova máquina de enchimento de varetas, daí devemos analisar se o custo de um lote pagaria, ou em quanto tempo pagaria o investimento feito na compra de uma nova máquina. Esta análise cabe ao setor de compras e planejamento. A proposta deste trabalho é a identificação do posto o qual “trava” o fluxo de produção de forma analítica e a apresentação de uma solução, aumentando desta forma, significativamente a produção do produto.

6. REFERÊNCIAS

- SEILA, A.F. Introduction to simulation. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference.
Cardoso, E.M., “Energia Nuclear”, Apostila Educativa, Comissão Nacional de Energia Nuclear.
Harrel,C.R., 2003, “Simulation Modeling Using ProModelTM Technology”, Department of Manufacturing Engineering, Brigham Young University, Provo UT 84062, USA.
Escola Politécnica da USP, “Modelagem de Sistemas de Eventos Discretos”, 15 Jan. 2010.
Indústrias Nucleares do Brasil, “Conhecendo o Elemento Combustível”, Ago. 2009.
< <http://www.poli.usp.br/d/pmr5008/Arquivos%5CProModel.pdf>>

7. DIREITOS AUTORAIS

Os direitos autorais pertencem a João Luís Aguiar de Abreu.

PRODUCTION PROCESS SIMULATION NUCLEAR FUEL ROD OF ANGRA 1

João Luís Aguiar de Abreu, joaofls@hotmail.com¹

¹Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rodovia Presidente Dutra km 298 (sentido RJ-SP) – Polo Industrial – Resende/ RJ – Cep:27.537-000

Abstract. *This work aims to simulate the production process of the rods that make up the nuclear fuel element of the type used in 16STD Angra 1, made in the Nuclear Industries of Brazil. The fuel rods are components of the fuel element and serve as support pellets of uranium dioxide, a barrier against the release of fission products and are part of the system that maintains the critical geometry so that when activated in the reactor fission occurs, thus the rod is one of the main components of a fuel element. The production process consists of steps of welding, filling, testing and inspections. There will be a computer simulation of the production process of the rod using the program PROMODEL times are measured in each sub- process and the productive capacity of each of these we have the productivity of the process and thus identify the bottleneck and providing opportunities for optimization of this process. This simulation aims to optimize the utilization of machines and operators involved in the process. The sub-processes to be modeled are: TIG welding, the filler rods with pellets of uranium dioxide (UO₂), dimensional inspections of the rods, coupling sub-component in the rod, filling gas helium, welding WPS washing rods, test Tightness and storage. Thus the process will be presented, simulation, identification of difficulties and bottlenecks in the process will be developed and suggestions for improvements.*

Keywords: *Simulation, Fuel Rod, Optimization, Process, ProModelTM*