



APLICABILIDADE DE SIMULAÇÃO UTILIZANDO OS MÉTODOS DE MONTE CARLO E HIPERCUBO LATINO NA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

José Luiz Ferreira Martins, jlfmtem@vm.uff.br¹

Miguel Luiz Ribeiro Ferreira, miguelluiz@lamis.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco D, Sala 269, CEP:24210-240, Niterói, Brasil.

Resumo: Neste trabalho compara-se a capacidade de simulação pelos Métodos de Monte Carlo e Hipercubo Latino na estimativa da produtividade do processo de soldagem elétrica TIG em obras de montagem de tubulações industriais com base em pequenas amostras. O estudo foi realizado a partir da análise de uma grande amostra coletada em obras realizadas na Refinaria Duque de Caxias (REDUC), Rio de Janeiro, Brasil, onde foi utilizado o software ControlTub 5.3 para a aquisição dos dados. Na simulação utilizou-se o ambiente do programa MathWorks. Para cada análise são comparados os resultados dos métodos de simulação utilizados e avaliadas as diferenças entre eles na identificação da produtividade do processo de soldagem elétrica TIG. Os resultados do trabalho demonstram a viabilidade da aplicação destes métodos na estimativa da produtividade na soldagem de tubulações industriais. Por outro lado, demonstra-se que a metodologia apresentada possibilita a criação de cenários para avaliação da probabilidade de ocorrência de estimativas de produtividade podendo ser utilizada na análise de risco de prazos e orçamentos de obras industriais.

Palavras-chave: produtividade, Monte Carlo, Hipercubo Latino, soldagem

1. INTRODUÇÃO

Neste artigo avalia-se a viabilidade da utilização de simulação de Monte Carlo e Hipercubo Latino na estimativa da produtividade da soldagem de tubulações industriais de aço carbono com o processo TIG. Também são comparados e analisados os resultados dos métodos de simulação propostos. Para realização do trabalho utilizou-se uma amostra de referência que tem como base os dados históricos coletados por Gioia et. al. (2009), de onde foram retiradas pequenas amostras aleatórias, com reposição, considerando cada uma delas como se os dados restantes do conjunto amostral fossem desconhecidos. A partir de cada pequena amostra são gerados dados virtuais através da simulação com os Métodos de Monte Carlo e Hipercubo Latino. Na seqüência, são apresentadas as funções de probabilidade acumulada (FPA), correspondentes a cada simulação. Comparando-se estas curvas com a obtida pelo conjunto de dados da amostra de referência, que representa o universo do parâmetro, avalia-se o grau de precisão da estimativa gerada pela simulação. Uma vez constatada a aplicabilidade deste método é possível a utilização do mesmo na monitoração da produtividade em soldagem. O método permite a avaliação da probabilidade de ocorrência de estimativas de produtividade, viabilizando uma observação otimista, média e pessimista; constituindo-se numa ferramenta para análise de riscos de prazos e orçamentos de obras de montagem de tubulações industriais.

2. INDICADORES DE PRODUTIVIDADE EM SODAGEM

Nos métodos e processos utilizados na indústria da construção é necessária a introdução de recursos humanos, materiais e monetários, tendo como resultado um produto. Classicamente, a produtividade é definida pela relação ente os recursos humanos utilizados para obtenção do produto no tempo necessário para tal. Assim, Diekmann e Heinz (2001) definem a produtividade como a relação do homem-hora [Hh] utilizado no processo de conversão construtiva com a quantidade de produtos obtidos. Estes autores definem o Homem-hora como sendo, a dedicação do trabalhador para realização de uma determinada tarefa em uma hora. Assim, a quantidade de tempo do trabalhador consumida em sua jornada de trabalho é medida em Homens-Hora, sendo esta unidade é a que é utilizada pela indústria.

Com relação à soldagem, a produtividade é, de forma geral, a quantidade de metal de solda depositado em relação à quantidade de recursos humanos consumidos na soldagem. Nos processos de soldagem, a produtividade é a relação entre o volume, em [cm³] ou a massa depositada [kg], pelo [Hh] consumido na soldagem. Assim, a unidade utilizada é [cm³/Hh], ou [kg/Hh]. Verifica-se que o dimensional adotado é representado pelo inverso da definição de Diekman e

Heinz (2001), pois, neste caso é interessante avaliar a medida da produtividade ao invés da improdutividade, conforme estabelecido pelos referidos autores.

Na monitoração da produtividade na soldagem são mencionados na literatura vários indicadores. Dentre eles, existem indicadores que consideram somente a deposição com o arco aberto e os que consideram o tempo de execução total da junta, sendo que estes últimos são os mais usados na indústria; conforme evidenciado em PROMINP (2010), elaborado com a participação da indústria de construção e montagem nacional, onde são estabelecidos, entre outros, padrões para indicadores de produtividade de soldagem. Outros trabalhos importantes sobre índices de produtividade em soldagem mencionados na literatura abordam a importância deste tipo de medida. São destacadas aqui as considerações de Page e Nation (1967), que realiza uma abordagem abrangente sobre a utilização do Homem-hora em diversas conjunturas e situações de soldagem; a AWS (2002) estabelece oito tipos de medida gerais de produtividade e Brito e Paranhos (2005) abordam a dependência do processo de soldagem na produtividade, nos diversos métodos e processos utilizados na indústria.

No caso dos indicadores que consideram o tempo de execução total da junta em sua grande maioria relacionam o volume de solda, normalmente expresso em $[cm^3]$, ou massa depositada, geralmente expressa em quilogramas [kg], considerados em relação à quantidade de Homens-hora [Hh] consumida na operação de soldagem. Quanto à mão-de-obra, são encontradas as seguintes condições: quantidade de Hh somente dos soldadores; quantidade de Hh dos soldadores mais ajudantes e; quantidade de Hh dos soldadores, ajudantes e supervisão de soldagem no nível mais baixo, que normalmente é intitulado de encarregado de solda pela indústria brasileira.

Os indicadores utilizados neste artigo têm como base os dados históricos levantados por Gioia et. al. (2009), em que consta a produtividade de cada sinete de soldador, em determinado número de dias trabalhados e é expressa em Junta Equivalente [Juequi], a qual é convencionada como o tempo para a soldagem de uma junta de diâmetro 4" Sch. 40 (Diâmetro externo=114.3 mm, diâmetro interno=102.26 mm, espessura de parede=6.02 mm), para outros diâmetros são estabelecidas correspondências com esta convenção, e transformada para $[cm^3/Hh]$. As medições de tempo para avaliação da equivalência das medidas foram realizadas em obra com a permissão da empresa e considerando a situação real de obra, em que o soldador tem necessidade de parar por falta de material, para ajuste da máquina de solda ou qualquer outra atividade. A mão de obra considerada na obtenção dos indicadores leva em conta as atividades de soldagem exercidas, somente, pelo soldador. Por outro lado, para a medida da produtividade é considerado que o início da contagem do tempo deve ser o início da soldagem da junta e o término deve ocorrer na limpeza final, posterior ao passe de acabamento.

3. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO

O método de Monte Carlo (MMC) tem como base a geração de uma quantidade de números pseudo-aleatórios previamente estabelecidos, com seus valores distribuídos segundo uma função com parâmetros identificados na amostra a ser analisada, e a partir de critérios de avaliação de sua aderência em relação à distribuição dos elementos da amostra. A função geratriz a ser utilizada como função densidade de probabilidade (FDP) deve apresentar forma semelhante a da distribuição dos elementos da amostra pelas classes a serem calculadas em condições pré-estabelecidas. A quantidade de números pseudo-aleatórios a serem gerados para a simulação são estabelecidos de acordo com as recomendações fornecidas em Cochran(1954) e Morano e Ferreira (2003a). Assim, a partir da amostra, com as classes e a quantidade de números pseudo-aleatórios definidos, a simulação é realizada. A partir deste ponto é realizada a verificação da distribuição dos números gerados em relação à distribuição inicial, por teste de aderência qui-quadrado e por comparação da máxima verossimilhança da simulação em relação à amostra. Com a condição de aprovação do teste de aderência, encerra-se a análise com a avaliação dos resultados obtidos na simulação.

O método de Hipercubo Latino (LHS) é semelhante ao MMC, com a diferença básica de que as classes passam a ser tratadas como estratos e os números pseudo-aleatórios são distribuídos de forma proporcional a distribuição dos elementos de cada amostra pelos estratos estabelecidos. Pilger et. al (2005) realiza uma abordagem profunda sobre os métodos de simulação e o aumento da sua eficiência, apresenta a proposta de substituição do método de Monte Carlo pela técnica de "*Latin Hypercube Sampling*" (LHS) considerando a maior precisão e rapidez que o método fornece para todo modelo de incerteza; Maschio et. al. (2009) apresenta a aplicação da técnica de Hipercubo Latino na integração do ajuste histórico de produção com a análise de incertezas com vista a modelos mais confiáveis para a previsão de produção de petróleo e gás. A função geratriz a ser utilizada como função densidade de probabilidade (FDP) é gerada a partir da união dos pontos médios de cada estrato e deve apresentar forma semelhante a da distribuição dos elementos da amostra pelos estratos a serem calculados em condições pré-estabelecidas. A quantidade de números pseudo-aleatórios a serem gerados para a simulação é estabelecida de forma semelhante à descrita no MMC, de acordo com as recomendações fornecidas em Cochran (1954) e Morano e Ferreira (2003a, b). Assim, a partir da pequena amostra, com os estratos e a quantidade de números pseudo-aleatórios definidos proporcionalmente a cada estrato, a simulação é executada. A seguir é realizada a verificação da distribuição dos números pseudo-aleatórios em relação à proporção da distribuição inicial estratificada, por teste de aderência qui-quadrado e por comparação da máxima verossimilhança da simulação em relação à pequena amostra. Com a condição de aprovação do teste de aderência, encerra-se a análise com a avaliação dos resultados obtidos na simulação.

A metodologia utilizada neste trabalho é semelhante à apresentada por Martins et al. (2011), Martins e Ferreira (2011) e Martins et al. (2012), para o processo de soldagem elétrica com eletrodo revestido Assim, pretende-se ampliar

o conhecimento da aplicabilidade dos métodos de simulação em avaliar a produtividade dos processos de soldagem, aqui considerando juntas soldadas com o processo TIG.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para os dois métodos o tratamento dos dados contidos na amostra de referência, deve ser cumprido às seguintes etapas: 1. Verificar se a amostra coletada é boa para o nível de significância estabelecida. Se a amostra for considerada boa agrupar os dados em uma tabela com intervalos de classe ou em estratos, para a construção de histograma de frequência. Caso contrário fazer uma coleta maior até que haja compatibilidade com o tamanho da amostra e o intervalo de significância previamente estabelecido e/ou vice-versa. 2. Avaliar a distribuição cuja função densidade de probabilidade (FDP) é uma variável aleatória contínua que represente melhor os dados amostrais organizados de acordo com a etapa 1. Para esta avaliação o teste da máxima verossimilhança é bastante adequado, tendo em vista a capacidade de comparação da função que melhor se adapta ao comportamento do processo, através da amostra em análise. 3. Após a implementação das etapas 1 e 2 avaliar o método de simulação a ser aplicado, seja o método de Monte Carlo, Hipercubo Latino, ou pelas duas metodologias e executar as simulações com a geração dos números pseudo-aleatórios correspondentes em cada método, com base na distribuição definida em 2, considerando os intervalos estabelecidos em 1. 4. Avaliar se o número de elementos das simulações realizadas é satisfatório, sendo que caso contrário a etapa 3 deverá ser repetida até que haja, pelo menos, um elemento em cada classe/estrato. Dependendo das condições de variação nas simulações serão realizados testes de avaliação dos máximos e mínimos possíveis nas simulações. A validação pelo método de Monte Carlo é realizada através do teste Qui-Quadrado para verificar o grau de aderência dos dados amostrais em relação aos dados simulados, ou pela comparação da máxima verossimilhança de cada. Para o método de Hipercubo Latino dividem-se os elementos pelos estratos realizando os sorteios equivalentes ao percentual atribuído a cada estrato e a avaliação do grau de aderência é realizada de forma idêntica a utilizada no MMC. 5. Com base nas simulações obtidas em 4, constroem-se as funções de probabilidade acumulada (FPA), a partir das quais realiza-se a avaliação da capacidade de cada simulação de pequena amostra retratar de forma confiável os intervalos de variação da produtividade do processo.

4.1. Descrição da Base de Dados

Como referido anteriormente, para o experimento utilizou-se a base de dados de Gioia et. al. (2009) e com as pequenas amostras escolhidas de forma aleatória, com reposição, da amostra de referência. A amostra de referência considerou a apropriação mínima de 10 dias efetivamente trabalhados. Este critério foi adotado com base na prática operacional, em que é percebido que um soldador com dez dias de atividade efetiva esta em condição de regime de sua produtividade, Martins et. al. (2012). Os elementos da base de dados foram obtidos em obras na Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), no Rio de Janeiro, Brasil; cujas medições foram realizadas pela contratada, verificadas pela fiscalização e validadas com a utilização do *software* ControlTub 5.3.

As amostras coletadas são apresentadas na forma de valores médios diários dos indicadores de produtividade para cada soldador com atividade no campo de duas empresas prestadoras de serviços. Os elementos das amostras foram introduzidos no *software* com cada soldador representado por um sinete, em que é atribuída uma numeração para cada individuo envolvido no procedimento. Estes indicadores são tratados e apresentados com dimensional em volume de solda depositado em junta de topo por homem hora [cm^3/Hh], na montagem de tubulação.

Tabela 1. Estatística da Amostra de Referência e das Pequenas Amostras [cm^3/Hh]

Estatística	163elTIG	20elTIG	15elTIG	10elTIG
Máximo	9.90	8.20	8.20	8.2
Mínimo	1.00	1.70	1.70	1.7
Média	4.19	4.57	4.51	4.27
D Padrão	1.58	2.01	2.09	2.44
Mediana	4,06	4.41	4.10	3.38
Moda	3.60	2.70	2.70	2.70
Coef Variação	0.38	0.44	0.46	0.57

A amostra de referência é constituída de 163 elementos e é denominada 163elTIG. As pequenas amostras são retiradas de forma aleatória, com reposição, da amostra de referência, com 20, 15 e 10 elementos cada; sendo denominadas 20elTIG, 15elTIG, 10elTIG, respectivamente. Os dados apresentados na Tab. (1) referem-se à estatística destas amostras. Deve-se ressaltar que outras análises com pequenas amostras foram realizadas, com resultados semelhantes aos apresentados neste trabalho.

4.2. Definição da Função Geratriz e das Classes dos Histogramas para Simulação

Para o Método de Monte Carlo, de acordo com Morano e Ferreira (2003), Zio et al (2006), Tipper (2008) e Wu (2008), a Função Geratriz para simulação é definida utilizando-se a curva Beta. Por outro lado, Gupta et al (2008), Royall (2000), Triola (1999) e Batista e Couto (2002), consideram o método de máxima verossimilhança para comparação utilizando as funções Beta e Weibull. A função geratriz para as amostras 163elTIG, 20elTIG 15elTIG e 10elTIG, considerando a função Beta e Weibull, apresentam os seguintes parâmetros de forma e de escala das funções mostrados na Tab. (2).

Tabela 2. Parâmetros de forma e de escala das funções Beta e Weibull das amostras

Amostra	Função Beta		Função Weibull	
	Alfa	Beta	a	b
163elTIG	3.38	4.56	4.70	2.83
20elTIG	2.71	3.20	5.17	2.55
15elTIG	2.55	3.06	5.11	2.44
10elTIG	1.87	2.40	4.86	1.99

Com relação ao critério da máxima verossimilhança, realizou-se a avaliação de cada amostra, para a distribuição Beta e Weibull, com um nível de significância de 99%, com o objetivo de identificar a função que melhor se enquadra na forma da distribuição dos dados. A máxima verossimilhança relativa é obtida pelo cálculo do menor valor algébrico da máxima log-verossimilhança das funções em que cada amostra é submetida, dividido pelo número de elementos da amostra, para o caso da função Beta. Para a Função Weibull é representada pelo maior valor algébrico da máxima log-verossimilhança calculada para cada amostra, dividida pelo número de elementos da amostra considerada; em conformidade com o estabelecido em MathWorks (2001, 2007). Os resultados da máxima verossimilhança relativa são mostrados na Tab. (3).

Tabela 3. Máxima Verossimilhança Relativa das amostras históricas de soldagem TIG

Função\Amostra	163elTIG	20elTIG	15elTIG	10elTIG
Beta	-0.40	-0.27	-0.25	-0.16
Weibull	1.86	2.06	2.08	2.16

Observando-se os valores obtidos na Tab. (3) verifica-se que em todas as amostras a Função Weibull apresentou os maiores valores de Máxima Verossimilhança. Assim, a Função Weibull com os parâmetros apresentados na Tab.(2) é a que melhor representa cada amostra do processo. Como a amostra de referência é conhecida, pode-se comparar e afirmar que a pequena amostra que melhor representa o processo é a 20elTIG, pois o valor de sua Máxima Verossimilhança é o mais próximo da amostra de referência 163elTIG. Na condição da amostra de referencia não ser conhecida, identifica-se que a amostra com maior Verossimilhança é a amostra 10elTIG. De qualquer forma, considerando a primeira situação, tem-se que a amostra com melhor verossimilhança em relação à amostra de referência é a amostra 20elTIG.

Na definição das classes e estratos, para elaboração dos histogramas, é utilizado o critério de Sturges. Da mesma forma, para o estabelecimento da quantidade de números pseudo-aleatórios, utilizam-se as recomendações de Cochran(1954) e Morano e Ferreira (2003a). Assim, com as classes e os estratos definidos, seus intervalos de variação e respectivos valores médios é possível a obtenção das funções de probabilidade acumulada (FPA) de cada amostra e a partir daí pode ser iniciada cada simulação.

No método para simulação por LHS, divide-se a amostra em estratos e considera-se a quantidade de elementos em cada estrato. Estes elementos representam uma proporção em relação ao total da amostra e cada estrato é representado por sua média, desvio-padrão, máximo e mínimo. É estabelecida uma função geratriz para cada estrato. Para o estabelecimento do número de estratos utiliza-se o mesmo critério para a definição das classes utilizados no MMC, bem como da quantidade de números pseudo-aleatórios a ser gerado, porém neste contexto, distribuídos de forma proporcional ao número de elementos em cada estrato da pequena amostra em análise.

Em ambos os métodos de simulação, quem orienta a quantidade de classes ou estratos são as pequenas amostras utilizadas para as análises. Cabe ressaltar que em uma pequena amostra dividida em estratos é possível que em um ou mais estratos haja algum que não contenha nenhum ou apenas um elemento da amostra. Na primeira situação o mínimo, máximo, média são iguais e representados pelo valor do ponto médio do estrato correspondente. Na segunda situação o mínimo, máximo, média são iguais e representados pelo valor do elemento da amostra. Estas situações ocorrem na pequena amostra 10elTIG e estão aqui registradas para comparar as simulações e mostrar a capacidade dos métodos, Martins et al. (2012)

4.3. Simulação pelos Métodos de Monte Carlo (MMC) e Hipercubo Latino (LHS)

Com a função densidade de probabilidade (FDP) e o nível de significância estabelecido, definido o número de classes a ser utilizado e a quantidade de números pseudo-aleatórios a serem gerados por um gerador deste tipo de número, neste trabalho em conformidade com o estabelecido em MathWorks (2001, 2007), roda-se a simulação de Monte Carlo. Os números pseudo-aleatórios gerados são distribuídos nas classes previamente estabelecidas e, assim, é identificada a FPA de cada simulação realizada. Em seguida, realiza-se um teste de aderência dos dados da simulação com os dados da amostra. Os testes utilizados são o teste qui-quadrado e o teste da máxima verossimilhança relativa da simulação e da amostra. Aprovada a aderência da simulação em relação à amostra é calculada a estatística da simulação.

Para a estruturação do modelo de simulação com o método de LHS, as amostras são divididas em estratos, de forma semelhante à utilizada no Método de Monte Carlo. O método de LHS é estruturado da seguinte forma: a) Na pequena amostra considerada é calculado para cada estrato o valor médio, a quantidade de elementos, a média e o desvio-padrão; nos estratos que por ventura não haja pelo menos um elemento, a média e o desvio-padrão são considerados como o valor médio do estrato e zero, respectivamente; esta condição deve ser evitada, com a redução do número de estratos, se for possível; b) Com a quantidade de elementos em cada estrato é calculado o valor percentual correspondente; desta forma, é possível estabelecer a função de probabilidade acumulada (FPA) da pequena amostra; c) Com o valor percentual dos elementos pertencentes a cada estrato estabelece-se a distribuição percentual dos números pseudo-aleatórios a ele destinados e esta estruturada em conformidade com MathWorks (2001, 2007); d) Definido o número de elementos da simulação, a mesma é acionada e são gerados os números pseudo-aleatórios correspondentes a cada estrato, com os dados gerados é identificada a FPA da simulação realizada; e) A partir daí, é necessário realizar um teste de aderência dos dados da simulação com os dados da amostra, o teste é realizado pela avaliação da máxima verossimilhança relativa da simulação com relação a amostra; f) Aprovada a aderência da simulação, é calculada a estatística da simulação.

Na seqüência, são realizadas as comparações das respostas obtidas pelas simulações das pequenas amostras em relação às informações fornecidas pela amostra de referência. Assim, podem-se comparar os métodos de simulação e avaliar o comportamento da estimativa da produtividade em todos os cenários de variação do processo pela observação das respectivas FPA.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na análise das amostras 20elTIG, 15elTIG e 10elTIG, bem como, da amostra de referência 163elTIG, são apresentadas a seguir. Esta amostra de referência retrata o comportamento do processo em análise, ou seja, do universo estudado, em função do tamanho da amostra de 163 elementos. Na análise dos resultados verificou-se o grau de aderência entre a amostra de referência e as simulações obtidas a partir das pequenas amostras, para os métodos MMC e LHS.

5.1. Pequena Amostra 20elTIG com 20 elementos

A amostra 20elTIG é retirada de forma aleatória da amostra de referência 163elTIG. Para a simulação pelo MMC inicialmente é avaliada a função densidade de probabilidade que melhor se adapta a amostra analisada. Utilizando-se a avaliação da máxima verossimilhança entre as funções consideradas, a que melhor se ajustou foi à curva de Weibull. Realizando a simulação pelo MMC utilizando a FDP de Weibull, admitindo-se um nível de significância de 99%, com uma quantidade de 1000 números pseudo-aleatórios, obtém-se a estatística apresentada na Tab. (4). Da mesma forma, realizando a simulação pelo LHS, com uma quantidade de 1000 números pseudo-aleatórios, divididos de forma proporcional ao percentual atribuído a distribuição dos elementos da amostra pelos estratos, anteriormente definido, obtém-se a estatística apresentada na Tab. (4).

Tabela 4. Estatística da Simulação da Pequena Amostra 20elTIG [cm³/Hh]

Estatística	Amostra	MMC Weibull	LHS
Máximo	8.20	8.20	8.93
Mínimo	1.70	1.96	0.80
Média	4.57	4.49	4.56
D Padrão	2.01	1.12	1.97
Mediana	4.41	4.43	4.43
Moda	2.70	1.96	0.80
Coef Variação	0.44	0.25	0.43

Estas simulações foram consideradas validas devido a que os testes de número mínimo de elementos em cada classe ficou maior que um, no MMC, os testes de qui-quadrado ficaram abaixo do valor máximo admitido e os testes de verossimilhança relativa das simulações foram idênticos ao da amostra.

A representação da FPA da amostra de referência e da simulação MMC e LHS da pequena amostra 20elTIG são representadas na Fig. (1).

Observando-se a Fig. (1a), pode-se afirmar com um nível de significância de 99% que a simulação pelo MMC apresenta uma produtividade 100% do processo de soldagem TIG de 7.3 cm³/Hh. A produtividade nas cotas 95% e 90% são, respectivamente, de 5.6 e 5.4 cm³/Hh com a função Weibull. Da mesma forma, na Fig. (1b) pode-se afirmar que, na simulação com LHS, a produtividade na cota 100% é de 7.5 cm³/Hh e nas cotas 95% e 90% é de 7.0 cm³/Hh e 6.6 cm³/Hh, respectivamente, configurando os cenários resultantes desta simulação. Assim, tem-se a referência básica dos cenários da estimativa de produtividade do processo, com a simulação da amostra 20elTIG, para o dimensionamento mais adequado da mão de obra a ser utilizada.

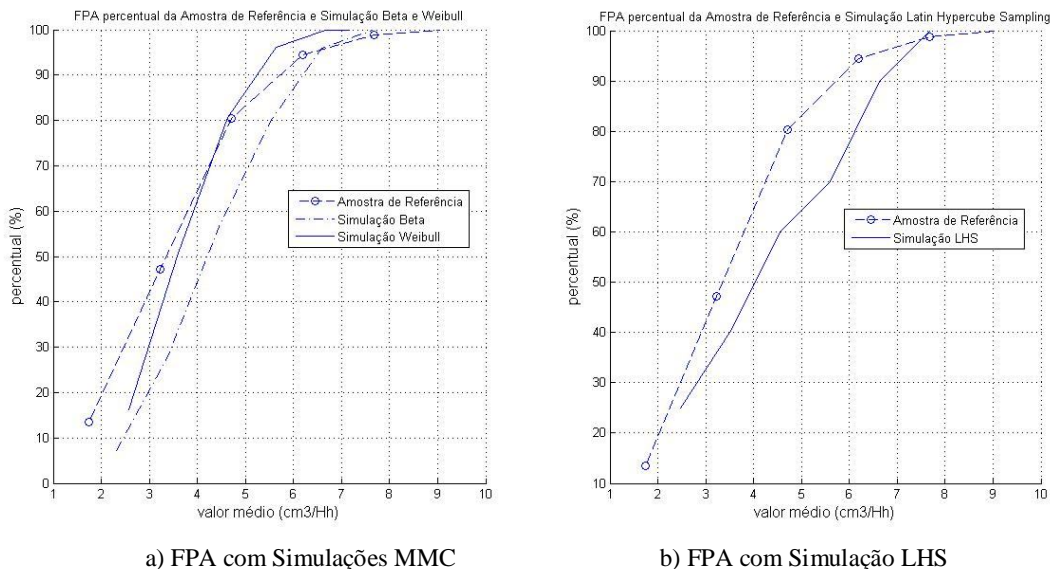


Figura 1. FPA da amostra de referência e simulação da amostra 20elTIG

5.2. Pequena Amostra 15elTIG com 15 elementos

A amostra 15elTIG é retirada de forma aleatória da amostra de referência 163elTIG. Para a simulação pelo MMC inicialmente é avaliada a função densidade de probabilidade que melhor se adapta a amostra analisada. Utilizando-se a avaliação da máxima verossimilhança entre as funções consideradas, a que melhor se ajustou foi à curva de Weibull. Realizando a simulação pelo MMC utilizando a FDP de Weibull, admitindo-se um nível de significância de 99%, com uma quantidade de 1000 números pseudo-aleatórios, obtém a estatística apresentada na Tab. (5). Da mesma forma, realizando a simulação pelo LHS, com uma quantidade de 1000 números pseudo-aleatórios, divididos de forma proporcional ao percentual atribuído a distribuição dos elementos da amostra pelos estratos, obtém-se a estatística apresentada na Tab. (5).

Tabela 5. Estatística da Simulação da Pequena Amostra 15elTIG [cm³/Hh]

Estatística	Amostra	MMC Weibull	LHS
Máximo	8.20	8.20	9.25
Mínimo	1.70	1.93	0.64
Média	4.51	4.39	4.51
D Padrão	2.09	1.13	2.03
Mediana	4.10	4.33	4.12
Moda	2.70	1.96	6.11
Coef Variação	0.46	0.26	0.45

Estas simulações foram consideradas validas devido a que os testes de número mínimo de elementos em cada classe ficou maior que um, no MMC, os testes de qui-quadrado ficaram abaixo do valor máximo admitido e os testes de verossimilhança relativa das simulações foram idênticos ao da amostra.

A representação da FPA da amostra de referência e da simulação MMC e LHS da pequena amostra 15elTIG são representadas na Fig. (2).

Observando-se a Fig. (2a), pode-se afirmar com um nível de significância 99% que a simulação pelo MMC apresenta uma produtividade 100% do processo de soldagem TIG de 7.5 cm³/Hh. A produtividade nas cotas 95% e 90%

são, respectivamente, de 6.2 e 5.5 cm³/Hh com a função Weibull. Da mesma forma, na Fig. (2b) pode-se afirmar que, na simulação com LHS, a produtividade na cota 100% é de 7.5 cm³/Hh e nas cotas 95% e 90% são de 7.2 cm³/Hh e 6.9 cm³/Hh, respectivamente, com a configuração dos cenários resultantes desta simulação. Assim, tem-se a referência básica dos cenários da estimativa de produtividade do processo, com a simulação da amostra 15elTIG.

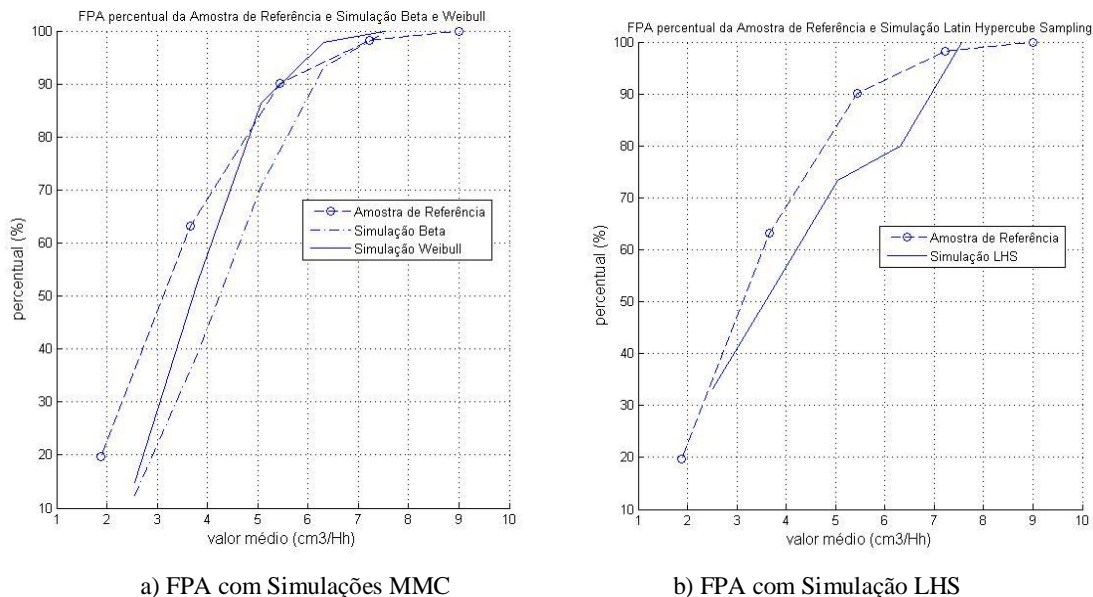


Figura 2. FPA da amostra de referência e simulação da amostra 15elTIG

5.3. Pequena Amostra 10elTIG com 10 elementos

Como nas amostras anteriores, a amostra 10elTIG é retirada de forma aleatória da amostra de referência 163elTIG. Para a simulação pelo MMC inicialmente é avaliada a função densidade de probabilidade que melhor se adapta a amostra analisada. Utilizando-se a avaliação da máxima verossimilhança entre as funções consideradas, a que melhor se ajustou foi à curva de Weibull. Realizando a simulação pelo MMC utilizando a FDP de Weibull, admitindo-se um nível de significância de 99%, com uma quantidade de 1000 números pseudo-aleatórios, obtém a estatística apresentada na Tab. (6). Realizando a simulação pelo LHS, com uma quantidade de 1000 números pseudo-aleatórios, divididos de forma proporcional ao percentual atribuído a distribuição dos elementos da amostra pelos estratos, obtém-se a estatística apresentada na Tab. (6).

Tabela 6. Estatística da Simulação da Pequena Amostra 10elTIG [cm³/Hh]

Estatística	Amostra	MMC Weibull	LHS
Máximo	8.20	8.20	9.48
Mínimo	1.70	1.80	0.74
Média	4.27	3.98	4.28
D Padrão	2.44	1.16	2.33
Mediana	3.38	3.88	3.60
Moda	2.70	1.80	0.74
Coef Variação	0.57	0.29	0.54

Estas simulações foram consideradas validas devido a que os testes de número mínimo de elementos em cada classe ficou maior que um, no MMC, os testes de qui-quadrado ficaram abaixo do valor máximo admitido e os testes de verossimilhança relativa das simulações foram idênticos ao da amostra.

A representação da FPA da amostra de referência e da simulação MMC e LHS da pequena amostra 10elTIG são representadas na Fig. (3).

Observando-se a Fig. (3a), pode-se afirmar com um nível de significância de 99% que a simulação pelo MMC apresenta uma produtividade 100% do processo de soldagem TIG de 7.3 cm³/Hh. A produtividade nas cotas 95% e 90% são, respectivamente, de 5.0 e 4.7 cm³/Hh com a função Weibull. Da mesma forma, com as informações fornecidas na Fig. (3b) pode-se afirmar que, na simulação com LHS, a produtividade na cota 100% é de 7.5 cm³/Hh e nas cotas 95% e 90% é de 7.2 cm³/Hh e 7.1 cm³/Hh, respectivamente, com a configuração dos cenários resultantes desta simulação.

Assim, tem-se a referência básica dos cenários da estimativa de produtividade do processo, com a simulação da amostra 10elTIG.

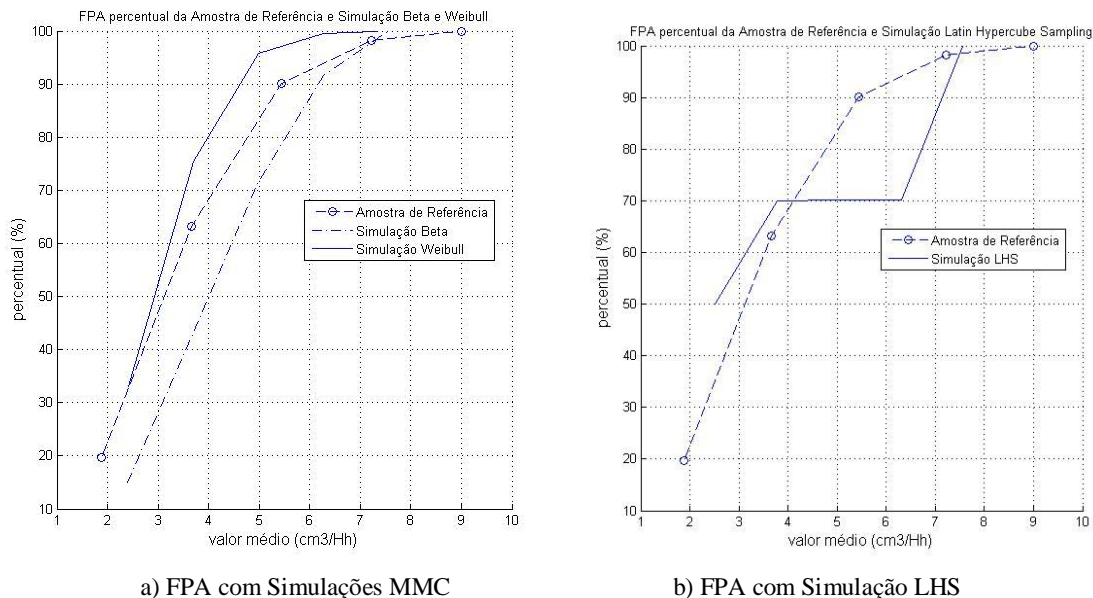


Figura 3. FPA da amostra de referência e simulação da amostra 10elTIG

5.4. Análise do Resultado das Simulações

Os resultados obtidos pelos dois métodos demonstram a viabilidade da utilização dos mesmos para avaliação da produtividade nos casos estudados, pois as funções obtidas por simulação têm forma semelhante às correspondentes na amostra de referência.

As observações que são identificadas, na amostra de referência, podem ser resumidas em: a média e o desvio padrão do processo são de $4.19 \text{ cm}^3/\text{Hh}$ e $1.58 \text{ cm}^3/\text{Hh}$, respectivamente.

A avaliação da máxima verossimilhança das funções aplicáveis para a análise possibilitou a comparação da função que melhor se adapta a distribuição dos elementos das amostras analisadas pelo MMC. Na análise de produtividade do processo TIG verificou-se que a função que melhor representa o processo é a distribuição de Weibull, como constatado pelos gráficos das FPA das simulações em comparação com a amostra de referência.

Com relação à quantidade de números pseudo-aleatórios gerados na simulação de cada amostra foi utilizado o máximo de 1000 números e foi tomado o cuidado de verificar a quantidade mínima de um elemento por classe no MMC. Assim, não houve necessidade de alterar o número de classes calculadas pela regra de *Sturges*.

O valor de produtividade máxima esperada, lido na cota de 100% da FPA, é um valor mais interessante pelo fato de necessitar de um valor menor de Hh para a realização da tarefa. Assim, quando se avalia a produtividade de um processo de soldagem em $[\text{cm}^3/\text{Hh}]$ a FPA obtida representa a produtividade possível do processo de um valor percentual mínimo, passando pela média, mediana, moda, não necessariamente nesta ordem, até o valor de percentual 100% que corresponde à produtividade máxima esperada. Pela avaliação da capacidade 100% e, por exemplo, 95% refletem a condição de tangente zero da variabilidade do máximo alcançável pelo processo analisado. Assim, é de “boa norma” observar a produtividade nas cotas 100%, 95%, 90%, média e o mínimo para avaliar a variação existente entre estes valores. A comparação da tangente em cada ponto da FPA representa a variação da inclinação desta função. Quanto menor a tangente, maior será a variação da produtividade considerada e vice-versa, acarretando maior ou menor dispersão.

Tabela 7. Cenários de Produtividade dos Exemplos $[\text{cm}^3/\text{Hh}]$

Amostra	Otimista (90% FPA)	Produtividade Média	Pessimista (mínimo)
163elTIG (Referência)	5.40	4.19	1.00
MMC 20elTIG	5.40	4.49	1.96
MMC 15elTIG	5.50	4.39	1.93
MMC 10elTIG	4.70	3.98	1.80
LHS 20elTIG	6.60	4.56	0.80
LHS 15elTIG	6.90	4.51	0.64
LHS 10elTIG	7.10	4.28	0.74

As estimativas para controle da produtividade ficam mais bem definidas tendo em vista a capacidade de identificação da estimativa de produtividade otimista, média e pessimista, como visto na Tab. (7), onde são apresentados os cenários para os exemplos utilizados neste trabalho.

6. CONCLUSÕES

Pelos resultados apresentados, verifica-se a aplicabilidade da simulação pelos métodos de Monte Carlo e Hipercubo Latino na avaliação da produtividade do processo de soldagem TIG aplicado a montagem de tubulações no parque industrial brasileiro, com base em pequenas amostras. Tal fato é de importância fundamental para a monitoração da produtividade da soldagem durante um empreendimento, pois, permite uma monitoração periódica em intervalos de tempo curtos e eventuais correções de rumo, com objetivo de assegurar cumprimento de prazos e orçamento da obra, empresas de construção e montagem, quanto pela contratante nas atividades de fiscalização de obra. Usualmente, utiliza-se um valor de produtividade média antes da execução da obra, a qual somente é aferida após a conclusão das atividades previstas.

Quanto à função geratriz para simulação MMC, a que apresentou valores mais próximos a situação real é a função Weibull. Consta-se que para o processo de soldagem TIG o MMC apresenta resultados mais semelhantes aos resultados apresentados pela amostra de referência do que os resultados apresentados pelo LHS. Deve-se ressaltar que as funções utilizadas no LHS não apresentam relação direta com as utilizadas no MMC. De qualquer forma, verifica-se a aplicabilidade dos métodos apresentados.

No estabelecimento de critérios de utilização da metodologia elaborada é possível considerar que a avaliação da produtividade em uma perspectiva otimista esteja em torno da cota de 90% da FPA, considerando o ajustamento da dispersão dos elementos da amostra e respectiva simulação, uma perspectiva média na cota da média e uma perspectiva pessimista na cota do valor mínimo informado pela pequena amostra disponível.

Com os resultados apresentados pode-se afirmar que a metodologia apresentada permite estabelecer estimativas mais apropriadas e em condição de realimentação para tomadas de decisão de redirecionamento dos parâmetros que influenciam na produtividade do processo de soldagem considerado.

Identifica-se a necessidade de realizar avaliações e simulações em laboratório e nas áreas disponibilizadas pelos empreendedores, pelas contratantes e contratadas para estabelecimento de correlação nestes ambientes de trabalho.

Observa-se a importância da participação das empresas da área de construção, montagem em participar com dados relevantes a serem apropriados, de atividades vinculadas, para possibilitar análises mais próximas da realidade neste tipo de indústria.

7. REFERÊNCIAS

- AWS - American Welding Society. Welding, 2002, "Related Expenditures and Productivity Measurement in U.S. Manufacturing, Construction, and Mining Industries", 90 p.
- Batista J. L. F. e Couto, H. T. Z., 2002, "A razão de verossimilhança como alternativa aos testes de aderência: um exemplo de distribuição diamétricas de florestas tropicais", 47a. Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS), Rio Claro - Programa e Resumos, 42-46.
- Brito, J. D. e Paranhos, R., 2005, "Como Determinar os Custos da Soldagem", Ed. Paranhos.
- Cochran, W. G., 1954, "The Combination of Estimates from Different Experiment", *Biometrics*, 10, 1, pp. 101-129.
- Constâncio, D. S., Ferreira, M. L. R. e Freire, I. J., 2009, "Estimativa de Produtividade na Soldagem de Tubulações Industriais utilizando o Método de Monte Carlo", XXXV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem; ABS – Associação Brasileira de Soldagem. Piracicaba, São Paulo, Brasil.
- Diekmann, J. E. and Heinz, J., 2001, "Determinants of jobsite productivity", Construction Industry Institute Research Rep. No. 143-11, Univ. of Texas at Austin.
- Flanagan, R. and Norman, G., 2003, "Risk Management and Construction", London, Blackwell Science, 208 p.
- Gioia, A. L. S. ; Junior, I. F. da S., Ferreira, M. L. R., Lannes, D. P., Maia, M. P. e Pardal, J., 2009, "Avaliação da Metodologia da Produtividade na Atividade de Montagem de Tubulações em Obras Industriais", 10º COTEQ - ABENDE, Salvador, Brasil.
- Gupta, A., Mukherjee, B. and Upadhyay, S. K., 2008, "Weibull extension model: A Bayes study using Markov chain Monte Carlo simulation", Department of Statistics, & DST Centre for Interdisciplinary Mathematical Sciences, Banaras Hindu University, India, Reliability Engineering and System Safety 93, pp.1434-1443.
- Martins J. L. F., Ferreira, M. L. R. e Saraiva, J. M. F., 2011, "Estimativa da Produtividade em Soldagem pelo Método de Monte Carlo", *Soldagem & Inspeção*, 16, 03, PP.204-212.
- Martins, J. L. F. e Ferreira, M. L. R., 2011, "Avaliação da Produtividade do Processo de Soldagem de Eletrodo Revestido através de Simulação pelo Método do Hipercubo Latino", X Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica - CIBEM 10, pp. 3579 – 3588, Porto, Portugal.
- Martins, J. L. F. ; Ferreira, M. L. R.; Pardal, J. M. e Morano, C. A. R., 2012, "Comparación de la estimación de la productividad Del proceso de soldadura eléctrica por los métodos de simulación de Monte Carlo e Hipercubo Latino". *Información Tecnológica*. 23(4).

- Maschio, C.; Carvalho, C. P. V. e Schiozer, D. J., 2009, “Aplicação da Técnica do Hipercubo Latino na Integração do Ajuste de Histórico com a Análise de Incertezas”, 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás – ABPG, UFC, Fortaleza-CE, Brasil.
- MathWorks, MATLAB, 2001. “The language of technical computing. Using MATLAB”, Ver.6. The MathWorks Inc. Natick, MA, USA.
- MathWorks, 2007, “Statistics Toolbox™ 6” User’s Guide”, The MathWorks Inc.
- Morano, C. A. R. e Ferreira, M. L. R., 2003a, “Aplicação do Método de Monte Carlo em Análise de Riscos em Projetos de Construção”, XXXV SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Natal, Brasil.
- Morano C. A. R. e Ferreira, M. L. R., 2003b, “Metodologias de Gerenciamento de Risco em Projetos”, Engevista (UFF), 53 – 65, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.
- Nascimento L.S.V., Campos, J. N. B. e Studart, T. M. C., 2003, “Análise da Eficiência dos Métodos dos Momentos e da Máxima Verossimilhança na Estimativa de Parâmetros da Distribuição Gama II: Uma Abordagem Probabilística”, XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, Brasil.
- Page, J. S. and Nation, J. G., 1967, “Estimator’s Piping Man Hour Manual”, First Revision, Gulf Pub Comp. Houston, Texas.
- Pilger G. G, Costa, J. F. C. L. e Koppe, J. C., 2005, “Improving the Efficiency of the Sequential Simulation Algorithm Using Latin Hypercube Sampling”, Geostatistics Banff 2004, 14, Springer, pp. 989-998.
- PROMINP (Programa de Mobilização da Indústria do Petróleo e Gás Natural), Projeto E&P 27.5, 2010, “Métricas de Desempenho da Indústria Nacional”, Padrões de Métricas da Indústria EPC Nacional, Brasil.
- Royall R.M, 1997, “Statistical evidence: a likelihood paradigm”, Boca Ranton, Chapman & Hall/CRC, 191p.
- Tipper J. C., 2008, “A simple method for representing some univariate frequency distributions, with particular application in Monte Carlo-based simulation”, Computers & Geosciences, 34.
- Triola, M. F., 1999, “Introdução à Estatística”, 7ª. Ed., LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Wu Yun-Fu, 2008, “Correlated sampling techniques used in Monte Carlo simulation for risk assessment, Nuclear Safety Department”, Taiwan Power Company, 242, Roosevelt Road, Section 3, Taipei, Taiwan 100, Republic of China, International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 662–669.
- Zio E.; Baralidi, P. and Patelli, E., 2006, “Assessment of the availability of an offshore installation by Monte Carlo simulation”, Dipartimento Ingegneria Nucleare, Politecnico di Milano, Milan, Italy, International Journal of Pressure Vessels and Piping 83, pp. 312–320.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

APPLICABILITY OF SIMULATION USING THE METHODS OF MONTE CARLO AND LATIN HYPERCUBE SAMPLING TO ESTIMATE THE PRODUCTIVITY IN TIG WELDING PROCESS

José Luiz Ferreira Martins, jlfmtem@vm.uff.br¹

Miguel Luiz Ribeiro Ferreira, miguelluiz@lamis.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco D, Sala 269, CEP:24210-240, Niterói, Brasil

ABSTRACT

This paper deals with the comparison analysis considering the ability of Monte Carlo and Latin Hypercube Sampling simulation methods in estimating the productivity of the TIG electric welding method, that was applied in industrial works of piping assembly, based on small samples. The study was conducted by analyzing a sample collected in works made in Duque de Caxias Refinery (REDUC), where it was used ControlTub 5.3 software for data acquisition. In the simulation it is used the structure of the software MathWorks program. The simulations analyses are compared with the data base and so evaluated the differences between them in identifying the productivity of the TIG process. This paper shows the feasibility of using simulation methods to estimate the productivity in industrial welding of pipelines.

Key-words: Productivity, Maximum Likelihood, Monte Carlo, Latin Hypercube Sampling, Welding.