

MODELO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR DE PROCESSO ENTRE UMA PLANTA DE COQUERIA E UTILIDADES COM PARÂMETROS DETERMINADOS ATRAVÉS DE UM ALGORITMO GENÉTICO

GABRIEL NAZARETH GUEDES ALCOFORADO*, VALTER BARBOSA DE OLIVEIRA*, GUSTAVO MAIA DE ALMEIDA[†],
MARCOS ANTONIO DE SOUZA LEITE CUADROS[†]

**Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, ArcelorMittal Tubarão
Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 930 - Jardim Limoeiro, 29163-970 - Serra - ES – Brasil*

*[†]Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica, Instituto Federal do Espírito Santo
Rodovia ES-010 - Km 6,5 - Manginhos 29173 - 087 - Serra - ES – Brasil*

*E-mails: gabriel.alcoforado@arcelormittal.com.br, valter.oliveira@arcelormittal.com.br,
gmaia@ifes.edu.br , marcoantonio@ifes.edu.br*

Abstract—This paper proposes a mathematical model of a process steam distribution network, with parameters set through a genetic algorithm, with the purpose of maximizing the energy utilization in a steel plant. The model is based on thermodynamics principles, including the balance of mass and energy. To determine the model parameters, due the dependencies between the equations, a genetic algorithm was applied. Once the control systems are not usually interconnected, steam pressure oscillations may occur in the Coke Plant side or in the Utilities Plant resulting in a large amounts of wasted steam through independent relief systems. On a steel plant, steam can be used for some specific equipments or processes. In general, steam is considered a power source, applied on heating equipments and power plants for energy generation. Avoiding the steam waste, is possible to improve the energy utilization figures resulting in both financial and environmental gains.

Keywords—Process Steam Distribution, Modeling, Coke Plant, Utilities Plant, Genetic Algorithm, Energy Saving

Resumo—Este trabalho propõe um modelo matemático de uma rede de distribuição de vapor de processo, com parâmetros definidos através de um algoritmo genético, com o objetivo de maximizar a utilização de energia em uma usina siderúrgica. O modelo é baseado em princípios de termodinâmica, incluindo o balanço de massa e energia. Para determinar os parâmetros do modelo, devido as dependências entre as equações, foi aplicado um algoritmo genético. Uma vez que os sistemas de controle não são normalmente interligados, oscilações de pressão de vapor podem ocorrer no lado da Coqueria ou da Utilidades resultando em uma grande quantidade de desperdício de vapor por meio de sistemas de alívio independentes. Em uma usina siderúrgica, vapor pode ser usado para alguns equipamentos ou processos específicos. Em geral o vapor é considerado uma fonte de energia aplicada em equipamentos de aquecimento e em centrais de produção de energia. Evitando o desperdício de vapor, é possível melhorar a utilização de energia, resultando em ambos os ganhos financeiros e ambientais.

Palavras-chave—Distribuição de Vapor de Processo, Modelagem, Coqueria, Utilidades, Algoritmo Genético, Economia de Energia

1 Introdução

Uma grande quantidade de energia secundária como gases de alto poder calorífico, vapor e eletricidade são produzidos e recuperados no processo de fabricação de aço.

Essa quantidade totaliza em torno de 50% a 60% da energia bruta consumida no processo siderúrgico (ZHANG Qi, TI We, CAI Jiu-ju, DU Tao, WANG Ai-hua, 2011) apresentando em certos momentos um desequilíbrio entre a produção e o consumo em pontos diferentes da rede de distribuição de vapor. Uma vez que essa rede não possui um controle centralizado, esse desbalanço provoca a abertura de válvulas de alívio, culminando em emissões de vapor para a atmosfera.

Trabalhos como o de (SUN Wen-qiang, CAI Jiu-ju, SONG Jun, 2013) demonstram como alcançar a melhor distribuição na recuperação dos gases gerados nos processos de Coqueria (COG), Aciaria (LDG) e Altos-Fornos (BFG), incluindo o vapor gerado e extraído das caldeiras na área de Utilidades. Entretanto, a geração de vapor no CDQ (CDQ - Coke

Dry Quenching), localizado na área da Coqueria, e o balanço com o vapor gerado na Utilidades não são tratados em detalhe.

Em uma usina siderúrgica integrada, em termos de geração de vapor, pode-se destacar a planta de Coqueria, mais precisamente no apagamento a seco de coque (CDQ - Coke Dry Quenching) e a planta de Utilidades, com o foco nas caldeiras de vapor destinadas para a geração de energia elétrica.

O processo de apagamento a seco do coque é ilustrado na Figura 1.

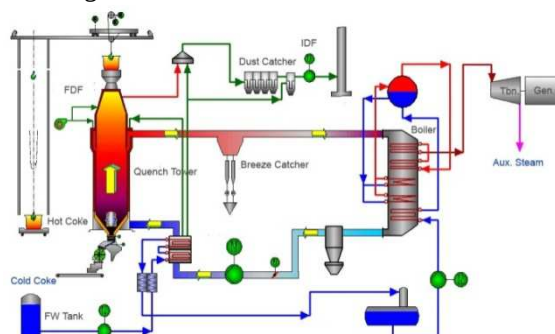


Figura 1. Apagamento a Seco do Coque (China Steel, 2015).

O apagamento do coque propriamente dito se processa, soprando o gás de resfriamento na parte inferior da câmara, passando por um sistema de distribuição e subindo em direção a parte superior, absorvendo o calor do coque e atingindo a temperatura de aproximadamente 800°C. O gás é recolhido por 32 canais dispostos em torno da parte superior da câmara, passando por um coletor primário onde as partículas maiores são retidas. A seguir o gás é conduzido para a caldeira onde cede seu calor à mesma, produzindo vapor (ABM- Associação Brasileira de Metalurgia, 2003).

Na área de Utilidades o processo nas caldeiras de vapor é representado na Figura 2.

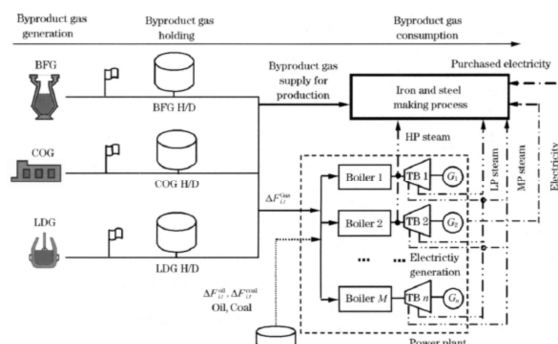


Figura 2. Geração de Vapor nas Caldeiras (ZHANG Qi, TI We, CAI Jiu-ju, DU Tao, WANG Ai-hua, 2011).

Os gases COG (Coke Oven Gas) gerado nas baterias de Coque, LDG (Linz-Donawitz) gerado na Aciaria e o BFG (Blast Furnace Gas) gerado nos Alto-Fornos são transportados para as caldeiras onde seu alto poder calorífico é aproveitado para aquecer a água e gerar vapor. Basicamente o vapor produzido nas caldeiras é destinado às turbinas para geração de energia elétrica, porém, é possível reduzir essa geração e destiná-lo a outros consumidores quando necessário.

Apesar das redes de vapor entre as plantas estarem interligadas, as mesmas possuem controles independentes, tornando o balanço entre a geração e o consumo um grande desafio. Em alguns casos, enquanto no CDQ descarta-se vapor para a atmosfera, na Utilidades o vapor destinado às turbinas é extraído (redução da geração de energia) para alimentar outros consumidores, provocando uma ineficiência na utilização do vapor.

Visando antecipar ações de controle para prevenir eventuais perdas de vapor e maximizar a produção de energia elétrica, é proposto um modelo da rede de distribuição de vapor. O modelo utiliza como entradas as vazões atuais de consumo e geração de vapor para estimar as variações de pressão em instantes de tempo futuros.

2 O Modelo de Balanço de Vapor

A rede de distribuição de vapor de processo em uma usina integrada de produção de aço é geralmente

alimentada pelo vapor extraído das caldeiras das centrais termelétricas e pelo vapor fornecido pelas caldeiras do CDQ.

A partir do balanço global de massa e de energia é possível obter um modelo simplificado da rede de distribuição de vapor de processo, capaz de descrever as principais dinâmicas da pressão do vapor saturado, que será apresentado a seguir.

No modelo apresentado na Figura 3, V representa volume, ρ massa específica, h entalpia específica, T temperatura, p é pressão e q vazão mássica. Os subscritos ps , w e m , indicam, respectivamente, vapor de processo (*process steam*), água (*water*) e metal. O subscrito t é utilizado para indicar uma quantidade total, ou seja, que diz respeito ao sistema como um todo. Os sobrescritos Coq e Utl indicam, respectivamente, quantidades relacionadas à rede de vapor de processo da área da Coqueria e à rede de distribuição de vapor de processo da área de Utilidades.

Para a modelagem do balanço de massa e de energia do sistema, a natureza distribuída do processo será aproximada em volumes concentrados, conforme a Figura 3.

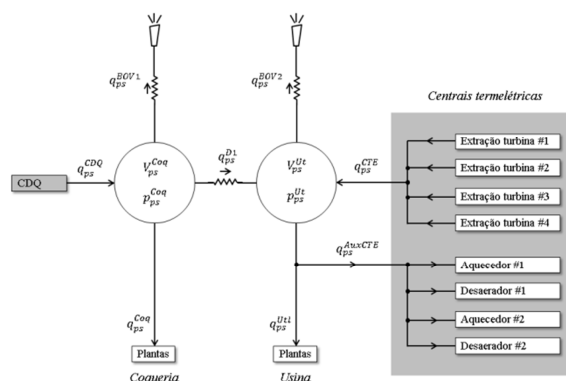


Figura 3. Modelo Simplificado de Balanço de Vapor

Considera-se que existe uma restrição de fluxo entre os volumes concentrados V_{ps}^{Coq} e V_{ps}^{Utl} , de maneira que é possível haver pressões diferentes em cada volume. Os balanços globais de massa e energia do sistema são dados respectivamente pelas equações (1) e (2):

$$\frac{d}{dt} (\rho_{ps}^{Coq} V_{ps}^{Coq} + \rho_{ps}^{Utl} V_{ps}^{Utl}) = (q_{ps}^{CDQ} + q_{ps}^{CTE}) - (q_{ps}^{Coq} + q_{ps}^{Utl}) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} [\rho_{ps}^{Coq} u_{ps}^{Coq} V_{ps}^{Coq} + \rho_{ps}^{Utl} u_{ps}^{Utl} V_{ps}^{Utl} + m_m^{Coq} c_m^{Coq} T_m^{Coq} + m_m^{Utl} c_m^{Utl} T_m^{Utl}] = (q_{ps}^{CDQ} - q_{ps}^{Coq} - q_{ps}^{D1}) h_{ps}^{CDQ} + (q_{ps}^{D1} + q_{ps}^{CTE} - q_{ps}^{Utl}) h_{ps}^{Utl} \quad (2)$$

onde:

• ρ_{ps}^{Coq} e ρ_{ps}^{Utl} são as massas específicas do vapor de processo, respectivamente, na rede de vapor da Coqueria e na rede de distribuição de vapor da área de Utilidades; u_{ps} é a energia interna do vapor de processo na área considerada; h_{ps} é a entalpia do vapor

de processo na área considerada; $\bullet V_{ps}^{Coq}$ e V_{ps}^{Ut} são os volumes internos das tubulações, respectivamente, da rede de vapor da Coqueria e da rede de distribuição de vapor da área de Utilidades; $\bullet m_m^{Coq}$ e m_m^{Ut} são as massas metálicas das tubulações, respectivamente, da rede de vapor da Coqueria e da rede de distribuição de vapor da área de Utilidades; $\bullet c_m$ é o calor específico do metal da tubulação; $\bullet T_m$ é a temperatura do metal da tubulação; $\bullet q_{ps}^{CDQ}$ é a vazão total de vapor recebida das caldeiras do CDQ; $\bullet q_{ps}^{Coq}$ é a vazão total de vapor consumida na Coqueria; $\bullet q_{ps}^{CTE}$ é a vazão total de vapor recebida das centrais termelétricas; $\bullet q_{ps}^{Ut}$ é a vazão total de vapor consumida na rede geral de distribuição; $\bullet q_{ps}^{D1}$ é a vazão de vapor no dessuperaquecedor que transfere vapor de processo da Coqueria para a rede de distribuição da área de Utilidades.

Desenvolvendo as equações 1 e 2, reescrevendo, discretizando e aplicando alguns fatores de correção para adequação das unidades de medida, obtém-se as equações (3) e (4):

$$p_{ps}^{Coq}((k+1)T) = p_{ps}^{Coq}(kT) + \frac{K_q}{K_p} T [p_{11} q_{ps}^{CDQ}(kT) + p_{12} q_{ps}^{CTE}(kT) + p_{13} q_{ps}^{Coq}(kT) + p_{14} q_{ps}^{Ut}(kT) + p_{15} q_{ps}^{D1}(kT)] \quad (3)$$

$$p_{ps}^{Ut}((k+1)T) = p_{ps}^{Ut}(kT) + \frac{K_q}{K_p} T [p_{21} q_{ps}^{CDQ}(kT) + p_{22} q_{ps}^{CTE}(kT) + p_{23} q_{ps}^{Coq}(kT) + p_{24} q_{ps}^{Ut}(kT) + p_{25} q_{ps}^{D1}(kT)] \quad (4)$$

onde: $\bullet K_p = 98,0665$ [kPa/(kgf/cm²)] é um fator de conversão de pressão em kgf/cm² para kPa; $\bullet K_q = (1000/3600) = 0,27777$ [(kg/s)/(t/h)] é um fator de conversão da vazão em t/h para kg/s; $\bullet p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$ e p_{15} são parâmetros calculados do lado Coqueria; $\bullet p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}$ e p_{25} são parâmetros calculados do lado Utilidades; $\bullet$ Massa em [kg]; $\bullet$ Pressão em [kgf/cm²]; $\bullet$ Temperatura em [°C]; $\bullet$ Entalpia em [kJ/kg]; $\bullet$ Massa específica em [kg/m³]; $\bullet$ Vazão em [t/h]; $\bullet$ Tempo de amostragem para discretização em segundos.

2.1 Propriedades do Vapor D'água

Dado que as propriedades do vapor d'água saturado podem ser calculadas em função da pressão, para o cálculo das propriedades termodinâmicas do vapor saturado na faixa de operação, foram determinadas aproximações por meio de funções polinomiais, à partir da tabela de valores do vapor d'água proposta em (Colonna, Van Der Stelt, 2004).

2.2 Determinação de Parâmetros

O modelo apresentado utiliza os valores de pressão e vazões atuais para prever a pressão nos instantes seguintes, entretanto, uma vez que os parâmetros de entalpia, massa específica e temperatura já foram determinados em função da própria pressão é preciso ajustar os valores de massa metálica e volume das tubulações de vapor existentes nos dois sistemas (Coqueria e Utilidades). Embora sejam parâmetros físicos das tubulações existentes, sua medição é difícil devido a longa extensão (superior a 20 km) e ramificações da rede de distribuição de vapor de processo.

Esses parâmetros representam grandezas de instalações reais, sendo necessário que além de proporcionarem um bom ajuste do modelo, devam se manter dentro de certos limites para que haja coerência com a realidade.

Para estimar esses parâmetros e validar o modelo, foi desenvolvido um algoritmo genético, utilizando como entradas, sinais medidos, amostrados durante um período de 24h com intervalo de 15[s], conforme as figuras de 4 a 10.

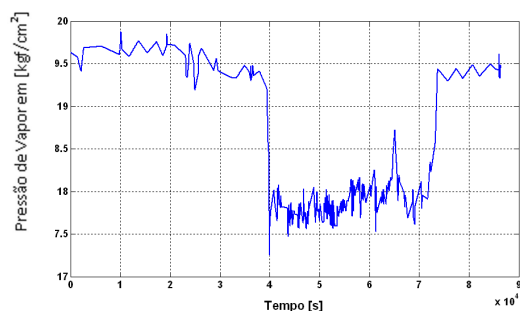


Figura 4. Pressão de vapor medida no volume da Coqueria

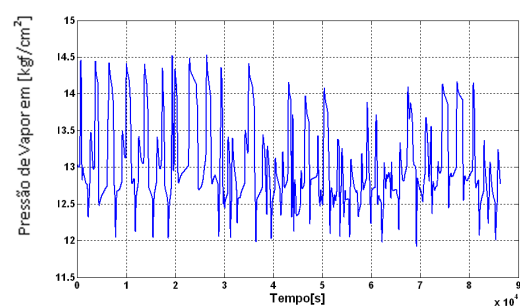


Figura 5. Pressão de vapor medida no volume da área de Utilidades

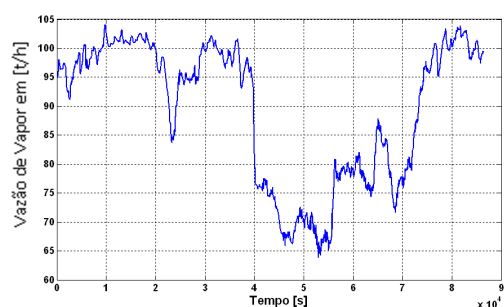


Figura 6. Vazão de vapor gerada medida no CDQ

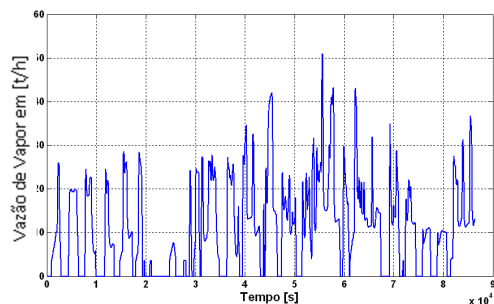


Figura 7. Vazão de vapor gerada medida nas CTEs

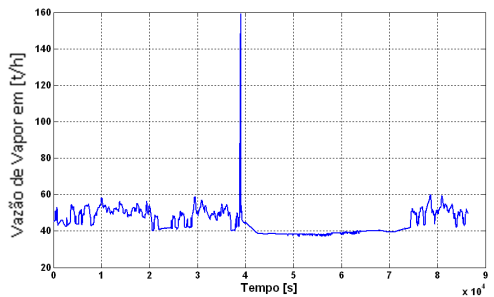


Figura 8. Vazão de vapor consumida medida na Coqueria

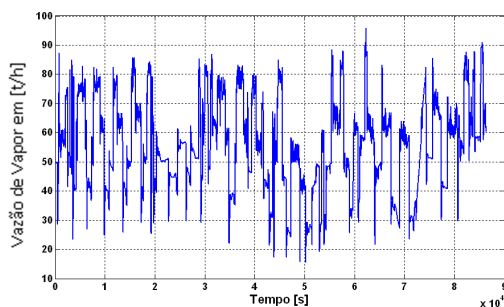


Figura 9. Vazão de vapor consumida medida na área de Utilidades

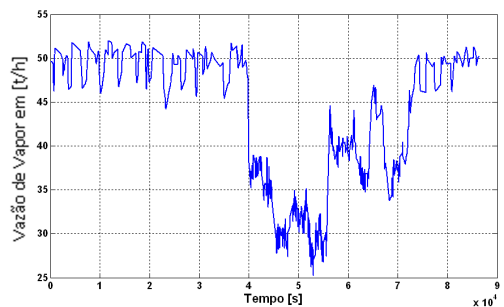


Figura 10. Vazão de vapor consumida no dessuperaquecedor

3 O Algoritmo Genético

Algoritmos Genéticos são muito úteis para dois propósitos distintos e abrangentes: a seleção de parâmetros para a otimização de performance de um sistema e a validação e ajuste de modelos quantitativos (Chambers Lance, 2001).

Nesse trabalho utilizaremos um algoritmo genético com objetivo de selecionar os melhores valores de massas metálicas (m_m^{Coq} e m_m^{Ut}) e volumes (V_{ps}^{Coq} e V_{ps}^{Ut}) que ajustem o modelo de balanço de vapor

apresentado, de modo que o menor erro possível entre os valores medidos e calculados de pressão sejam encontrados. À partir das equações (3) e (4) observa-se que existe uma interdependência cruzada entre os sistemas das áreas de Coqueria e Utilidades e vice-versa.

Por essa razão e por se tratar de um ajuste de quatro variáveis, foi determinado a aplicação de um algoritmo genético.

3.1 Aplicação do Algoritmo Genético

Visando restringir as possíveis soluções a valores industrialmente factíveis, a aplicação do algoritmo genético foi separada em duas fases.

Na primeira fase foi introduzido um conceito de “tubulação equivalente”, considerando que todas as tubulações possuem o mesmo diâmetro e calculando possíveis valores de massa e volume a partir do comprimento. Dessa forma os valores encontrados de massa e volume são totalmente proporcionais ao comprimento e servirão de base para a segunda fase.

Na segunda fase, aplica-se novamente o algoritmo genético, agora de maneira clássica, visando encontrar valores massa volume que ajustem o modelo, entretanto, esses valores serão limitados a uma variação de $\pm 20\%$ dos valores encontrados na primeira fase.

Foi utilizado o software Matlab R2013a em uma máquina virtual com WindowsXP, tendo como host um MacBook-Pro I5 com 8Gb de RAM.

3.2 Arquitetura do Algoritmo Genético

O fluxo simplificado do Algoritmo Genético pode ser observado na figura 11. Na primeira etapa são definidas as restrições e condições gerais do algoritmo. Em seguida a população inicial é gerada e cada cromossomo é avaliado através de uma função de aptidão. Nesse caso, utilizamos as próprias equações do modelo para gerar valores de pressão e compará-los as medições reais através da função “compare” do Matlab. A saída dessa função consiste em uma nota de avaliação que varia entre 0 e 100% e representam o *fitness* (percentual de ajuste dos dados medidos) de cada cromossomo. Na etapa de cruzamento as avaliações são utilizadas para determinar o potencial de escolha de um determinado cromossomo utilizando o método da roleta. Após o cruzamento de um par de cromossomos, um ou mais elementos dos cromossomos gerados podem receber novos valores, caracterizando a etapa de mutação onde cada cromossomo possuirá 0,2% de chances de sofrer alterações em ou mais de seus elementos.

Esses novos cromossomos são novamente avaliados e comparados com os valores ótimos armazenados.

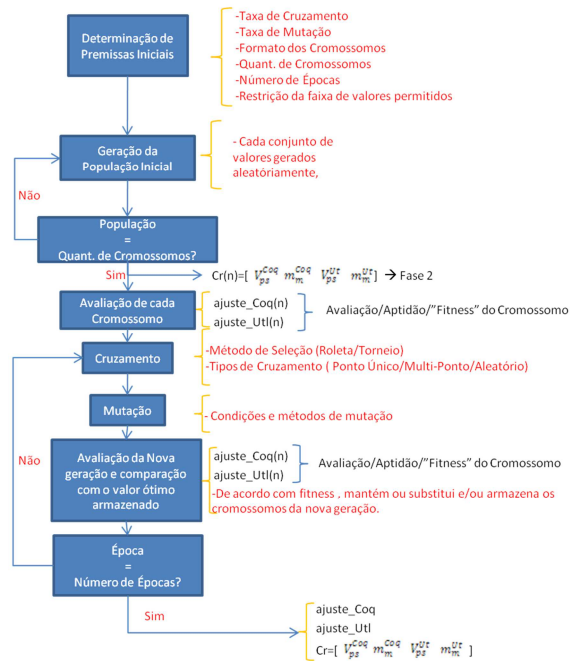


Figura 11. Fluxo Simplificado do Algoritmo Genético

3.3 Premissas

O número de épocas foi delimitado em 100, visando atingir um erro mínimo mantendo uma quantidade razoável de iterações. O formato dos cromossomos foi mantido em números reais, sem codificação binária. Dessa forma, o cruzamento e o tratamento das informações se torna mais intuitivo e utiliza menos recursos computacionais.

3.4 Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação

A taxa de cruzamento é fixa em 80% sendo executado um cruzamento aritmético simples e a taxa de mutação foi delimitada em 0,2% sendo executado um procedimento parcial de mutação uniforme múltipla conforme a abordagem em (Chambers Lance 2001).

3.5 População Inicial e Função de Aptidão

Foi definida uma população de 50 cromossomos, compostos inicialmente pelo conjunto dos valores $[V_{ps}^{Coq}, m_m^{Coq}, L^{Coq}, V_{ps}^{Utl}, m_m^{Utl}, L^{Utl}]$ na primeira fase e $[V_{ps}^{Coq}, m_m^{Coq}, V_{ps}^{Utl}, m_m^{Utl}]$ na segunda. Para cada cromossomo aplicado nas equações do modelo, são retornados os valores calculados de pressão de vapor. Esses valores são comparados com os valores medidos através da função "compare" do Matlab, que utiliza o erro quadrático médio como referência. O objetivo é alcançar um ajuste de 100%. Dessa maneira, para cada cromossomo será gerado um valor de ajuste para Coqueria e Utilidades, compondo então a respectiva aptidão de cada cromossomo.

3.5 Cruzamento

Utilizando o método da roleta (Almeida Gustavo, Cuadros Marco, 2015) a partir dos valores de

aptidão encontrados, os cromossomos com maior aptidão terão mais chances de cruzarem entre si. O ponto de cruzamento é pré-definido na fase 1 e aleatório na fase 2, compreendendo apenas uma forma de cruzamento na fase 1 e 5 possíveis ações na fase 2, conforme a figura 12.

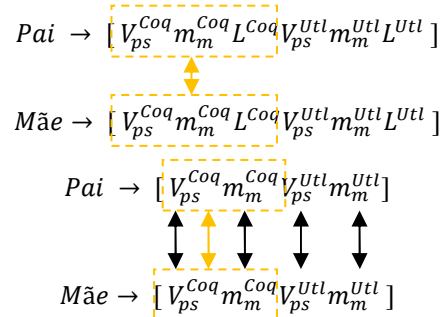


Figura 12. Possíveis pontos de cruzamento – Fase 1 e 2

3.6 Mutação

Cada cromossomo possui 0,2% de chances de sofrer mutação em algum de seus termos. Na fase 1 a mutação afeta diretamente o comprimento que por conseguinte altera seu respectivo volume e massa. Na fase 2, a mutação pode afetar diretamente qualquer um dos fatores volume e massa, respeitando os mesmos limites impostos para a criação da geração inicial.

3.7 Avaliação da Nova Geração

A nova geração é avaliada de maneira análoga a avaliação da geração inicial. Uma vez que sejam obtidos novos valores de ajustes e aptidões, os mesmos são comparados com o ajuste ótimo armazenado. Seguindo uma taxa de elitismo pré-fixada, alguns dos melhores valores da geração anterior são transmitidos diretamente para a nova geração.

4 Validação do Modelo

Na fase 1 do Algoritmo Genético, obteve-se 97,51% de ajuste no lado Coqueria e 90,78% no lado Utilidades (figura 13).

Os valores de volume, massa e comprimento alcançados na fase 1 foram: $V_{ps}^{Coq} = 389,3 [m^3]$; $m_m^{Coq} = 442,4 [ton]$; $L^{Coq} = 7657 [m]$; $V_{ps}^{Utl} = 987 [m^3]$; $m_m^{Utl} = 1122 [ton]$; $L^{Utl} = 19410 [m]$.

Na fase 2 do Algoritmo Genético, obteve-se 97,73% de ajuste no lado Coqueria e 91,96% no lado Utilidades (figura 14).

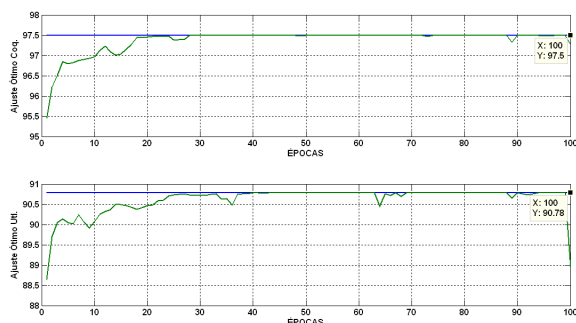


Figura 13. Resultados Parciais – Fase 1

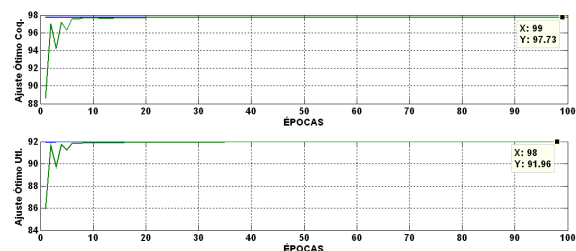


Figura 14. Resultados – Fase 2

Desse modo, foi possível alcançar valores de massa e volume conforme abaixo e os ajustes finais conforme figuras 15 e 16.

$$V_{ps}^{Coq} = 446,1 [m^3] / m_m^{Coq} = 379.57 [ton]$$

$$V_{ps}^{Utl} = 852,1 [m^3] / m_m^{Utl} = 1266 [ton]$$

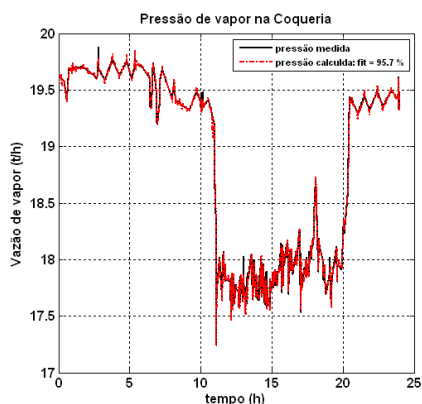


Figura 15. Resultados Finais de Ajuste- Coqueria

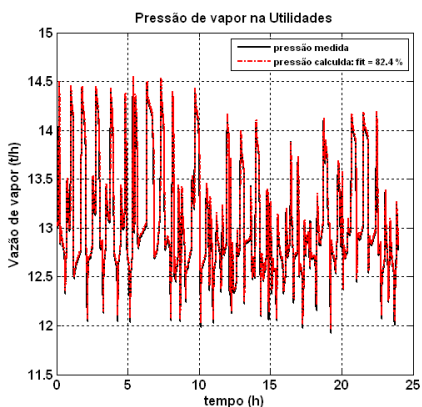


Figura 16. Resultados Finais de Ajuste– Utilidades

Com esses valores de massa e volume, os ajustes finais alcançados para o modelo de balanço de vapor foram de 95,7% para o lado Coqueria (figura 15) e 82,4% para o lado Utilidades (figura 16).

5 Conclusão

Os valores finais de massa metálica e volume interno das tubulações alcançados representam satisfatoriamente a realidade das instalações existentes ao passo que também conseguem ajustar o modelo de balanço de vapor ao processo. Os resultados de ajuste das pressões de vapor se mantiveram quando aplicados a outros intervalos de dados medidos. É importante ressaltar que as imprecisões nas medições de vazão foram corrigidas com a utilização de médias móveis na avaliação final dos ajustes. À partir da utilização desse modelo, espera-se desenvolver um algoritmo de otimização que reduzirá a instabilidade do balanço de vapor e consequentemente as perdas indesejadas que resultam em redução da geração de energia.

Agradecimentos

Agradeço ao IFES-Serra, em particular ao colega do curso de mestrado em engenharia elétrica pelo apoio.

Referências Bibliográficas

- ZHANG Qi , TI We, CAIJiu-ju , DU Tao , WANG Ai-hua (2011). Multi-Period Optimal Distribution Model of Energy Medium and Its Application. Journal of Iron and Steel Research, International Vol.18, No. 8; pp. 37-41
- ZHANG Qi , CAIJiu-ju , SONG Jun (2013). PlantWideSupplyDemand Forecast and Optimization of By productGasSysteminSteelPlant. Journal of Iron and Steel Research, International Vol.20, No. 9; pp. 01-07
- China Steel, (2015). CDQ-Coke Dry Quenching. [online] Disponível em: <http://www.csc.com.tw/csc_e/hr/green1.htm> [Acessado em 19 de Novembro de 2015].
- ABM - Associação Brasileira de Metalurgia(2003). Siderurgia para não Siderurgistas, pp. 40, Vitória-ES.
- Chambers, Lance (2001). The Practical HandBook of Genetic Algorithms, 2nd ed., ISBN 1-58488-2409-9.
- AlmeidaGustavo, Cuadros Marco (2015), "Inteligência Artificial – Algoritmos Genéticos", pp. 34-40.
- Collona P., Van Der Stelt.P(2004). Energy Technology Section. Disponível em: <<http://www.asimptote.nl/software/fluidprop>>. [Acessado em 16 Maio de 2016.]