

Implementação do sequenciamento de partida e operação de unidades de processamento de gás natural utilizando o método AHP

Implementation of startup sequencing and operation of natural gas processing units using the AHP method

Fábio Muniz Mazzoni* - fabiomuma@hotmail.com
André da Silva Barcelos* - andrebarcelos813@hotmail.com
Ana Paula Barbosa Sobral* - anapaulasobral93@gmail.com

*Universidade Federal Fluminense – (UFF), Rio das Ostras, RJ

Article History:

Submitted: 2020 - 01 - 18

Revised: 2020 - 01 - 19

Accepted: 2020 - 02 - 07

Resumo: A indústria de processamento de gás natural fornece produtos e derivados para sociedade, tendo como premissa atender à demanda de um mercado competitivo alinhada à produção enxuta e à otimização dos processos. Assim, esta indústria é composta por parques industriais que possuem mais de uma unidade de processamento de gás natural, necessitando de uma tomada de decisão assertiva para definição do sequenciamento de partida e operação dessas unidades. Esta seleção é estratégica para a organização e deve atender a diversos critérios, tais como: a demanda do mercado, vazão de produção, eficiência de produção, redução de desperdícios, produção enxuta, entre outras. Este trabalho tem por objetivo definir o sequenciamento de partida otimizada de 4 unidades de processamento de gás natural, que operam de acordo com a demanda nacional. Devido à natureza multivariável das plantas de processamento, adotou-se o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para otimizar esta etapa de tomada de decisão. Ao final deste trabalho, apresenta-se o resultado obtido pelo método (AHP), assim como análise da variabilidade, o sequenciamento de partida otimizado e propostas para continuação deste estudo.

Palavras-chave: Gás Natural; AHP; Produção Enxuta

Abstract: The natural gas processing industry supplies products and derivatives to society and is intended to meet the demand of a competitive market aligned to lean production and process optimization. Thus, this industry is composed of industrial parks, that have more than one natural gas processing unit and requires assertive decision making, to define the starting sequencing and operation of these units. This selection is strategic for the organization and must meet several criteria, such as: the market's demand, production flow, production efficiency, waste reduction, lean production, among others. The objective of this work is define the optimal start sequencing of 4 natural gas processing units, which go into parallel operation according to demand. Owing to the multivariate nature of processing plants, the analytic hierarchy process (AHP) was used to optimize this decision making step. At the end of this work, we present the results obtained by AHP method, as well as the feasibility analysis, optimized start-up sequencing and proposals for the continuation of this study.

Keywords: Natural Gas; AHP; Lean Production

1. Introdução

No atual cenário industrial, os gestores da produção requerem que as decisões referentes aos processos produtivos se encontrem alinhadas com os princípios lean manufacturing de otimização e produção enxuta. A necessidade de uma produção enxuta está relacionada com a competitividade do mercado, redução de custos, minimização de desperdícios e a melhoria contínua dos processos internos (Slack *et al.*, 2009).

A inserção da produção enxuta, ou *Lean Manufacturing*, revolucionou os métodos gerenciais de indústrias e empresas, proporcionando um melhor gerenciamento e maximização dos lucros por meio de uma potencialização da receita e, principalmente, redução de custos. A implementação da produção enxuta envolve mudanças de aspectos técnicos e socioculturais (Tortorella e Fogliatto, 2014).

O método de produção enxuta deve buscar resultados a partir da eliminação do desperdício em todos os níveis do processo produtivo, pois ter a organização enxuta é uma condição de sobrevivência em um mercado global e competitivo (Bhamu e Singh Sangwan, 2014). Faz-se necessário que os processos produtivos se encontrem sincronizados em relação ao recebimento de insumos e produção, com o viés da redução de desperdícios e custos (Marodin e Saurin, 2013). Assim, entende-se que o processo de tomada de decisão é um diferencial na competitividade da empresa e na sincronia dos seus processos produtivos com os princípios da produção enxuta.

Nesse contexto, o AHP (Analytic Hierarchy Process) torna-se uma ferramenta indispensável para tomada de decisões frente a um plexo de possibilidades, haja vista que as empresas necessitam de uma escolha inovadora e lucrativa para destacar-se no campo laboral. Dentre as vantagens do método, destaca-se a ponderação das opções de escolhas e o reconhecimento dos critérios mais importantes com conhecimento e experiência, mesmo em um sistema multivariável (Saaty, 1991).

Frente a essa perspectiva, técnicas computacionais e métodos para o auxílio da tomada de decisão que utilizam de lógica, estatística e álgebra multivariável são empregadas para auxiliar o gestor a tomar decisões em questões que envolvam a multiobjetividade (Domeneghini, 2015). Isso permite que a tomada de decisão se torne assertiva, pois trata-se de um método de apoio a decisão com foco na construção de opções e na escolha de alternativas que apresentem maior obtenção de sucesso (Almeida *et al.*, 2016).

Desta forma, os métodos de apoio à tomada de decisão são aplicáveis em áreas de negócios diversificadas, como por exemplo, a indústria de óleo e gás que contém processos que dependem da tomada de decisão em condição multivariável. Esse método atribui de forma significativa às possibilidades positivas e negativas para cada opção de escolha, direcionando para uma decisão que seja rentável e segura em longo prazo, definindo o conjunto de variáveis a serem selecionadas e avaliadas a fim de se determinar a melhor proposta (Wang, 2008).

A indústria de beneficiamento de gás natural (GN) utiliza-se de unidades de processamento de gás natural (UPGN's), que tem por objetivo atender à demanda da matriz energética nacional e apresentam desafios que necessitam de tomada de decisão multicritério pelos gestores (Marodin e Saurin, 2013). Diante destes desafios, destaca-se a necessidade de otimizar a partida e operação das UPGN's, dentro da premissa da otimização e produção enxuta (Domeneghini, 2015). Outrossim, um parque industrial que possui mais de uma UPGN, necessita de uma tomada de decisão para definição do sequenciamento de partida e operação, onde essa tomada de decisão é imprescindível, pois deve-se escolher a melhor sequência de partida de acordo com os critérios operacionais estabelecidos e os princípios da produção enxuta.

Ante o exposto, este trabalho tem como objetivo definir o sequenciamento de partida e operação de 4 UPGN's em um parque industrial. Este sequenciamento será definido por meio do método de análise multicritério, Analytic Hierarchy Process (AHP). Entende-se que a importância em definir um sequenciamento de partida e operação assertivo, está ligada com o atendimento à programação da produção, garantia da qualidade do produto, redução dos custos operacionais e de manutenção, assim como, o direcionamento apropriado dos investimentos.

Imerso nessa ótica, analisar as possibilidades de efetuação das ações necessárias é imprescindível para o sucesso efetivo da operação das 4 UPGN'S com uma redução significativa de desperdícios e custos, possibilitando a melhor definição do sequenciamento de partida e operação. Utilizar o AHP como método de multicritério é a opção mais viável e segura para atingir o objetivo pretendido na realização do sequenciamento de partida e operações das UPGN's.

Assim, divide-se este trabalho de maneira que a seção 2 apresenta o método de tomada de decisão AHP, enquanto que a seção 3 descreve o estudo de caso. Na seção 4, encontra-se o

experimento com o desenvolvimento da técnica de decisão multicritério e na seção 5, realiza-se a análise do resultado obtido. Na seção 6, conclui-se o trabalho apresentando o sequenciamento de partida, as melhorias que podem ser implementadas e a utilização deste artigo como base para o desenvolvimento de trabalhos com outros métodos decisão multicritério.

2. Método de tomada de decisão

Um problema multicritério, consiste em um cenário onde existem pelo menos duas alternativas viáveis, envolvendo múltiplas escolhas para o propósito de ordenação ou classificação das alternativas (Ensslin *et al.*, 2010). Um método para decisão é conduzido com o propósito de atender a múltiplos objetivos, que estão associados com as consequências da escolha, para cada alternativa a ser ponderada (Ho e Ma, 2018).

Nessa perspectiva, é importante ressaltar que existem vários métodos na classe de Tomada de Decisões com Múltiplos Critérios (Multiple Criteria Decision Making – MCDM), sendo o Analytic Hierarchy Process (AHP) o método mais utilizado por empresas e indústrias, por meio dos gestores responsáveis pelas tomadas de decisões, que devem ser cada vez mais assertivas. Sua alta eficiência na tomada de decisões utilizando análise contemplativa e de grande abrangência possibilitou o maior nível de adesão. Este trabalho utiliza-se do método AHP para auxílio à tomada de decisão do sequenciamento de partida e operação de 4 UPGN's localizadas em um polo industrial (Faria, 2011).

2.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

O AHP é um método matemático e analítico, desenvolvido pelo matemático Thomas Saaty na década de 1970, tendo este método a função de processar as preferências subjetivas dos especialistas consultados, criando hierarquias e realizando julgamentos, para tratar problemas que podem ter uma formulação ou um modelo incoerente (Schmoldt, 2013). Em complemento, o AHP destaca-se como um método de modelagem das preferências do especialista, dos objetivos e critérios e aborda a interdependência entre as alternativas e a decisão (Almeida *et al.*, 2016).

O método AHP teve inicialmente sua aplicação em uma variedade de decisões de compras, insumos, seleção de fornecedores e seleção de projetos em geral. Destaca-se a aplicação do método na instalação de indústria com o escopo de avaliação estratégica de tecnologias emergentes, serviços, fornecedores e para análise de equipamentos, de modo a

auxiliar as estratégias de negócios (Unal e Guner, 2009). Os resultados positivos e assertivos da metodologia Analytic Hierarchy Process possibilitaram que se tornasse um dos métodos mais influentes e utilizados na classe de múltiplos critérios.

A implementação deste método pode ser dividida em 4 etapas, descritas a seguir:

- a) Construção das hierarquias por Saaty;
- b) Comparação da matriz par-a-par;
- c) Análise e desenvolvimento do método AHP e
- d) Análise da consistência dos resultados.

Construção das hierarquias por Saaty: Inicialmente apresenta-se o objetivo do problema, os fatores de decisão e as alternativas tangíveis de solução. Em seguida, inicia-se a modelagem do problema estabelecendo uma hierarquia de decisão com a ponderação de um ou mais especialistas. Com essa abordagem de construção do problema, obtém-se a estruturação em níveis hierárquicos, o que facilita uma melhor compreensão e avaliação da etapa de construção de hierarquias.

Entende-se que os critérios e as alternativas podem ser estruturados de forma ordenada, sendo que o primeiro nível da hierarquia corresponde ao propósito geral do problema apresentado, por conseguinte o segundo nível da hierarquia corresponde aos critérios estabelecidos e por fim o terceiro nível das hierarquias reflete as alternativas (Marins *et al.*, 2009). No trabalho desenvolvido por Bornia e Wernke (2001), os autores esclarecem que a ordenação hierárquica proporciona ao responsável pela tomada de decisão uma “visualização do sistema como um todo e seus componentes, bem como interações destes componentes e os impactos que os mesmos exercem sobre o sistema”.

Comparação da matriz par-a-par: Nesta etapa utiliza-se de uma escala de julgamento para a comparação paritária, de acordo com o seu respectivo grau de importância (Saaty, 2013). Isto significa que é estabelecida uma comparação entre os critérios selecionados pela análise do especialista, onde este pondera esta matriz para posterior tomada de decisão. Uma vez que se trata de uma comparação entre dois elementos, deve-se levar em conta a ponderação do elemento mais importante, considerando o critério de intensidade (Ribeiro e Da Silva Alves, 2016). Esta comparação de importância pode ser observada conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Comparação de importância proposta para matriz par-a-par de criticidade

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Mesma Importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição entre duas definições

Fonte: Saaty (1991)

Análise e desenvolvimento do método AHP: Inicia-se a construção das matrizes pareadas de acordo com a comparação de importância, proposta por Saaty (2013), em seguida computam-se os cálculos analíticos para a obtenção dos autovalores da matriz par-a-par de criticidade. Uma forma analítica de obter os autovalores aproximados é utilizar-se de métodos que calculam a média aritmética, harmônica, geométrica ou ponderada de cada coluna normalizada da matriz par-a-par. A Figura 1 apresenta a matriz par-a-par de criticidade A como a matriz de comparação proposta, onde observa-se que a diagonal principal é preenchida pela unidade e os elementos da região triangular superior são inversos aos elementos da região triangular inferior, o que ratifica a comparação paritária (Saaty, 2013).

$$A = \begin{vmatrix} 1 & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} \\ 1/\alpha_{12} & 1 & \dots & \alpha_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/\alpha_{1n} & 1/\alpha_{2n} & \dots & 1 \end{vmatrix}$$

Figura 1 - Matriz par-a-par de criticidade
Fonte: Saaty (2013)

Os valores da matriz par-a-par de criticidade são fornecidos pelos especialistas, de acordo com a escala de julgamento (comparação de importância) do Quadro 1 e o autovalor (λ) é uma medida que será utilizada para análise de consistência da matriz par-a-par. Buscam-se todos os autovalores (λ) aproximados que devem ser calculados de acordo com as Equações 1 e 2.

$$a_{ij}w_j = \lambda_{max}w_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2)$$

De acordo com Saaty (2013), recomenda-se que seja realizado o cálculo dos autovalores (λ) através de uma média adequada ou por meio de outra métrica que promova uma maior consistência entre os dados, sempre que for inviável realizar o cálculo exato de λ . O autor esclarece que a matriz de comparação par-a-par que deve gerar as relações recíprocas conforme representado na Figura 1 e desta forma, para cada comparação de importância registrado na posição de linha i e coluna j , deverá haver um valor na posição de linha j e coluna i que garanta a reciprocidade.

Uma vez que seja inviável realizar os cálculos exatos de todos os autovalores (λ), deve-se adotar a estratégia de calcular o valor numérico aproximado dos autovalores e utiliza-se do maior autovalor (λ_{max}) que será maior do que o número de fatores de decisão em análise (n). Este n expressa a dimensionalidade (*rank*) da matriz par-a-par de criticidade. Segundo Saaty (2013), quanto mais próximo o valor de λ_{max} estiver de n , maior será a consistência da matriz par-a-par de criticidade, definida pelos especialistas.

Teoricamente espera-se que o valor de λ_{max} seja igual à dimensão da matriz par-a-par de criticidade (n) e entende-se que o desvio ($\lambda_{max} - n$), deve ser utilizado para medir o índice de consistência (IC), entre o resultado calculado e o teórico. Devido ao grau de liberdade da matriz par-a-par de criticidade ser ($n-1$), torna-se possível a obtenção de um IC de acordo com a Equação 3 proposta por Saaty (2013).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

Dessa maneira, o método AHP propõe calcular a razão de consistência (RC) utilizando-se da comparação de importância, apresentada no Quadro 1, através da equação denotada por $RC = IC/IR$, onde IR é o índice de consistência randômico que é obtido em uma

matriz recíproca de ordem n , com elementos não negativos e gerada randomicamente e limitados de 1 a 9 (Marins, 2009).

Os procedimentos para o cálculo da razão de consistência (RC) e do índice de consistência (IC) são determinados em subetapas específicas, onde utiliza-se da matriz par-a-par de criticidade para calcular o lambda max (λ_{max}) de acordo com a Equação 3.

Uma vez que se obtenha o IC, Saaty (2013) esclarece que a razão de consistência (RC) deve ser calculada de acordo com a Equação 4, onde um índice de consistência aleatório proposto pelo autor (ICA) deve ser utilizado.

$$RC = \frac{IC}{ICA} \quad (4)$$

Para a obtenção do ICA, utiliza-se a Tabela 1, onde observa-se que caso a RC seja maior que 0,1, recomenda-se que os especialistas reavaliem suas ponderações em busca de coerência nas suas decisões e comparações paritárias da matriz de criticidade A, pois estas encontram-se inconsistentes. Saaty (2013) recomenda ainda, que as comparações de importância sejam refeitas até que a RC seja satisfatória e atinja valores menores que 0,1.

Tabela 1: ICA's em função da ordem

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ICA	0	0	0,52	0,89	1,1	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Saaty (2013)

Análise de consistência dos resultados: Nesta última etapa, faz-se necessário verificar a consistência da matriz par-a-par de criticidade e, por conseguinte determinar se o processo decisório estabelecido pelo especialista está de acordo com as premissas definidas na etapa 2 (Iañez, 2006). A partir desta etapa (4), torna-se possível determinar a diferença relativa do modelo em relação a variação das relações paritárias. Nessa perspectiva, fica evidenciado que o ser humano tem a habilidade de estabelecer relações analíticas entre objetos e ideias, de forma que estas relações sejam coerentes entre si (Saaty, 2013).

Este trabalho utiliza-se do cálculo **exato** dos autovetores e autovalores da matriz par-a-par de criticidade para obter o valor exato de λ_{max} e dos autovetores, uma vez que é viável a computação destes elementos. Assim sendo, o cálculo do índice de consistência proposto por Saaty (2013), que computa valores aproximados de λ_{max} através de médias (aritmética, harmônica, geométrica ou ponderada) deve ser desconsiderado. Isto implica em maior

consistência dos cálculos em detrimento do aumento do custo computacional, que retorna o IC exato e possibilita uma decisão assertiva devido à redução dos erros de aproximação que seriam obtidos pela computação das médias (Faria, 2011).

3. Estudo de caso

A matriz energética nacional demanda o uso de diferentes fontes de energia para atender às necessidades da sociedade brasileira. Dentre estas fontes, encontra-se o GNP que é obtido a partir do processamento de GN, esta etapa é realizada em parques industriais que estão localizados próximos aos grandes centros consumidores (Tolmasquim, 2007). Nestes parques encontram-se UPGN's que são instalações industriais que entram em operação de acordo com a demanda nacional de GNP (Bronzatti, 2008).

Nesse sentido, as UPGN's (Unidades de Processo de Gás Natural) são instalações que fazem a separação do gás natural, dissociando as frações pesadas presentes no gás natural, do metano (C1) e do etano (C2.). Esse processo gera produtos importantes para o fornecimento energético, como o metano (C1), etano (C2.), propano (C3), butano (C4) e pentanos (C5+). Sendo o pentano (C5+) mais utilizado e conhecido como gasolina natural. Todos esses elementos constituem o GNP.

De acordo com Bronzatti (2008), a demanda nacional de GNP é variável, devido ao fato de estar inserida na matriz energética nacional e assim, o volume de GNP produzido pelas UPGN's também é variável. Para atender a esta premissa, os parques industriais fazem uso de duas ou mais UPGN's que entram em operação paralela para produzir de acordo com a demanda.

Entende-se que a necessidade em definir um sequenciamento de partida assertivo, está diretamente relacionada à qualidade do produto, a redução de custos operacionais, a garantia do atendimento da programação da produção e com os princípios da produção enxuta. Assim, este trabalho tem por objetivo definir o sequenciamento de partida e operação de 4 UPGN's em um parque industrial, por meio da aplicação do método AHP com a computação dos autovalores e autovetores exatos.

3.1 Processamento de gás natural

O GN é proveniente de poços de produção de petróleo e passa por um condicionamento e controle termodinâmico das variáveis a fim de enquadrar o vapor d'água e gases ácidos, posteriormente é processado por UPGN's para fracionamento. O

condicionamento e controle termodinâmico do gás natural têm como objetivo enquadrar as características necessárias ao transporte, realizado por meio de gasodutos, de maneira que este possa ser realizado sem prejuízo para as instalações de dutos utilizados nestas operações (De Oliveira, 2019).

As UPGN's são controladas para que os produtos gerados estejam dentro das especificações exigidas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) (Silva, 2013). Nessas unidades de processamento, o gás natural é submetido ao processo de desidratação e fracionamento, no qual a primeira etapa tem como finalidade a remoção da água livre e a segunda, tem por objetivo separar as frações molares de hidrocarboneto, gerando C_1 e C_2 , que formam o gás processado, C_3 e C_4 que formam o GLP - gás liquefeito de petróleo ou gás de cozinha; e por fim o C_5+ , igualmente denominado de gasolina natural. Assim, o tratamento nas UPGN's é utilizado, principalmente, para remover impurezas, contaminantes e para condicionar o gás de acordo com a ANP (Thomas, 2004).

A Figura 2 apresenta o arranjo de um parque industrial, que recebe GN como insumo e produz GNP com 4 UPGN's com processamento em paralelo. O GN é composto, majoritariamente, de metano (C_1), etano (C_2) e percentuais minoritários de outros compostos como propano (C_3), butano (C_4) e pentanos (C_5+), que são obtidos através da exploração de poços de petróleo.

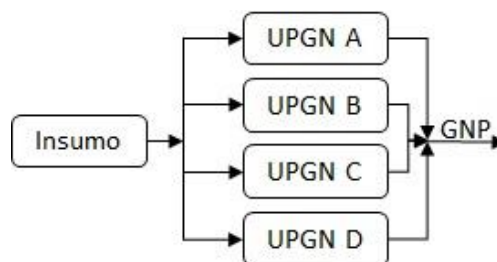


Figura 2 - Digrama de processamento

Em cada uma das UPGN's existe uma torre de processamento, que recebe o GN como insumo, onde o C_1 e C_2 correspondem às frações de menor peso molecular e maior volatilidade do GN, estas frações por sua vez, ascendem até o topo da torre de processamento, dando origem ao GNP. Por outro lado, o líquido de maior peso molecular (C_3 , C_4 e C_5+), descende até a região inferior da torre de processamento devido à ação da gravidade (Kidnay, 2011).

O GNP que ascende ao topo da torre de processamento é o produto de uma UPGN e será enviado ao mercado consumidor de acordo com a demanda. O líquido de fundo (C_3 , C_4 e

C₅₊), caracteriza um subproduto, que será encaminhado para unidades distintas de processamento de líquidos (Silva, 2013). Observa-se na Figura 3, o processamento do GN em GNP.

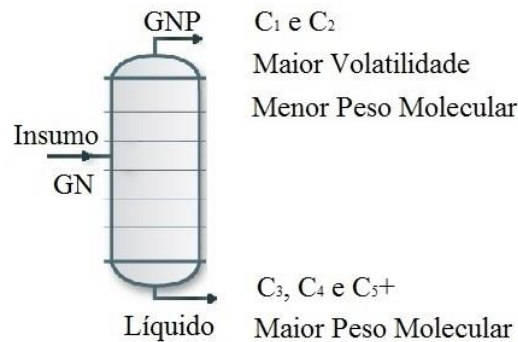


Figura 3: Torre de processamento

Devido ao fato de tratar-se de uma torre de processamento, existe a limitação de vazão máxima de insumo (GN), que deve ser controlada, pois caso admita-se uma vazão superior à aceitável, ocorrerá o arraste das frações de C₃, C₄ e C₅₊ para o topo da torre de processamento e, por conseguinte, ocorrerá a desespecificação do GNP (Domeneghini, 2015). A desespecificação do GNP, consiste no descumprimento dos padrões de qualidade estipulados pela ANP. Isto posto, observa-se o comprometimento da programação de produção e o atendimento à demanda da matriz energética.

Caso a demanda da matriz energética nacional aumente e atinja-se a capacidade máxima de produção de uma UPGN, inicia-se a partida de mais UPGN's em paralelo até que o volume de produção de GNP demandado seja estabelecido.

Devido às características operacionais das instalações, entende-se que existem diferenças de desempenho entre as quatro UPGN's, representadas por A, B, C e D, que se situam no mesmo parque industrial. Assim, a decisão de partida destas unidades considera a estabilidade operacional, vazão da produção, a eficiência da produção, o desperdício de insumo e a operacionalidade, sob o viés da otimização enxuta que serão descritas a seguir:

1. Estabilidade Operacional

Compreende-se por estabilidade operacional, a capacidade que uma unidade de processamento possui em manter-se com o comportamento termodinâmico controlado, de acordo com os parâmetros do processo, durante a fase de partida e operação (Fortuna, 2005).

Entende-se que existem diferenças de desempenho entre as instalações e sabe-se que

um maior nível de automação, controle e supervisão automática dos processos internos permitem a estabilidade do comportamento termodinâmico por mais tempo.

A estabilidade operacional garante a especificação do GNP no topo da torre de destilação e, por conseguinte, é facilitada pelo grau de automação disponível. De acordo com o especialista, o grau de automação e o número de sistemas automatizados promovem a estabilidade operacional de cada UPGN e está descrito na seguinte Equação 5:

$$B = 1,2C = 1,5A = 1,6D \quad (5)$$

Assim, entende-se que, em acordo com o especialista, a estabilidade operacional da UPGN B é a maior de todas, sendo 20% maior que a unidade C, 50% maior que UPGN A e, por conseguinte, 60% maior que a unidade D.

2. Vazão da produção

A vazão é a terceira grandeza mais medida nos processos industriais e suas aplicações são diversas, sendo utilizada desde aplicações simples como a medição de vazão de água em estações de tratamento e residências, até medição de gases industriais e combustíveis.

Para medir a vazão de produção $\mu_p(t)$, utiliza-se do somatório do volume de GNP produzido dividido pelo tempo de operação conforme a Equação 6. Outrossim, com a informação de vazão de produção ($\mu_p(t)$), torna-se possível balizar planos de manutenção e investimento nas instalações para que seus processos internos possam ser otimizados e atender aos princípios da produção enxuta.

$$\mu(t) = \frac{\sum_{t=0}^m v_p(t)}{\Delta t} \quad (6)$$

A computação dos valores obtidos por meio da Equação 6, permite obter a vazão máxima ($\mu_{p(max)}$) de cada uma das UPGN's e, por conseguinte, construir a Tabela 2. A UPGN A encontra-se com a maior vazão possível ($\mu_{p(max)} = 1$), quando comparada com as outras, que apresentam um valor de vazão de produção máxima inferior a 1.

Tabela 2 - Vazão de produção

UPGN	A	B	C	D
μ_{max}	1,0000	0,9074	0,9074	0,9359

3. Eficiência de produção

A vazão de produção de gás natural especificado, que ascende ao topo da torre de processamento ($\mu_p(t)$) e a vazão de insumo ($i_p(t)$), são parâmetros utilizados para medir a eficiência ($\xi(t)$) da planta. Para o cálculo da eficiência, calcula-se a razão da vazão de produção e a vazão de insumo através da Equação 7:

$$\xi(t) = \frac{\mu_p(t)}{\sum_{t=0}^m i_p(t)} \quad (7)$$

Esta equação retorna o valor de $\xi(t)$, que representa a eficiência em que a UPGN consegue transformar o insumo (GN) em produto (GNP) ao longo do tempo. Em uma planta teórica, para fins de simulação, este valor é 1, onde entende-se que todo o insumo é convertido em produto.

Devido aos desvios, descontrole nas condições termodinâmicas do processo e da produção de líquidos no fundo da torre de processamento (C₃, C₄ e C₅₊), parte do insumo (C₁ e C₂) pode ser convertido indevidamente e gerar desperdício de insumo, desta forma, utiliza-se da eficiência da produção $\xi(t)$ para medir o desempenho de conversão do insumo (GN) em produto (GNP). A Tabela 3 apresenta a máxima eficiência da produção ξ_{max} de cada planta em relação a planta teórica.

Tabela 3 - Eficiência de produção – Autores

UPGN	A	B	C	D
$\xi_{max(t)}$	0,9231	0,7058	0,7003	0,8874

4. Desperdício de insumo

Entende-se como desperdício de insumo, o volume total de GN que é admitido na torre de processamento e que por descontrole operacional ou desvios das condições enxutas do processamento, torna-se desespecificado e impossibilitado de converter-se em produto especificado (GNP).

O gás natural (GN) que ascendeu ao topo da torre de processamento e que por ineficiência ou instabilidade do processo encontra-se desespecificado, deve ser **reprocessado** ou enviado para o sistema de **rejeito**. O reprocessamento (μ_r) consiste em injetar o volume de gás (v_r) desespecificado na corrente de insumo (GN) da torre de processamento, onde a Equação 8 expressa o volume de gás reprocessado.

$$\mu_r(t) = \frac{\sum_{t=0}^m v_r(t)}{\Delta t} \quad (8)$$

O sistema de rejeito consiste em uma outra instalação industrial cuja finalidade é o descarte do volume de gás (v_b) que ascendeu ao topo da torre de processamento e encontra-se desespecificado (μ_b), de acordo com as normas da ANP. Observa-se por meio da Equação 9 a totalização deste volume.

$$\mu_b(t) = \frac{\sum_{t=0}^m v_b(t)}{\Delta t} \quad (9)$$

A vazão de gás desperdiçado (μ_b) é medida por meio da Equação 10 e consiste na soma da vazão de gás **reprocessado** (μ_r), com a vazão de gás enviada ao sistema de **rejeito** (μ_b).

$$\mu_d(t) = \mu_r(t) + \mu_b(t) \quad (10)$$

A Tabela 4 apresenta o resultado Equação 10 e representa o volume médio harmônico de desperdício de cada unidade do parque industrial em estudo. Este volume traduz a ineficácia do processamento e reflete custos adicionais para reprocessamento ou o desperdício representado pelo rejeito do produto não especificado. Assim, de acordo com os princípios *Lean* de produção enxuta, tais desperdícios devem ser minimizados e, por conseguinte, precisam estar no foco dos tomadores de decisão para constante busca de aperfeiçoamento das equipes de trabalho e investimentos para melhoria e manutenção das instalações industriais, compostas por equipamentos, acessórios, sistemas automatizados e demais periféricos (Bhamu e Singh Sangwan, 2014).

Tabela 4 - Desperdício de insumo

UPGN	A	B	C	D
$\mu_{médio}$	0,1419	0,1180	0,1312	0,1074

5. Operacionalidade

Desta forma, de acordo com o especialista, define-se que a operacionalidade está de acordo com a Equação 11 para estas unidades. O tempo necessário para a partida, estabilização e os recursos utilizados para que a unidade de processamento de gás natural entre na condição de produção é definido como operacionalidade. As UPGN's apresentam diferenças de *layout*, tecnologia, modelo de construção e particularidades em sua instalação,

que pondera sobre sua capacidade de partir e operar adequadamente, de acordo padrões e normas definidos.

$$C = 1,3B = 1,4D = 1,7A \quad (11)$$

Conforme observa-se, a UPGN C apresenta operacionalidade superior em 30% quando comparada com a unidade B, 40% para UPGN D e 70% para unidade A.

4. Experimento

Os resultados obtidos na seção 3, pela equação 5, que calcula a estabilidade operacional de cada UPGN, pela equação 11, que define a operacionalidade, e pelas Tabelas 2, 3 e 4, que organizam os resultados de cada UPGN, formam o conjunto de dados que serão utilizados para os experimentos com o AHP. Ao analisar estes dados, é possível determinar a sequência de partida e operação das UPGN's, onde prioriza-se a partida da melhor unidade de processamento disponível sequencialmente.

4.1 Desenvolvimento do AHP

A matriz de criticidade A é definida pelo especialista, onde a primeira coluna representa a estabilidade operacional da UPGN, enquanto a vazão de produção encontra-se na segunda coluna, a eficiência de produção encontra-se na terceira e por fim, o desperdício de insumo e a operacionalidade encontram-se na quarta e quinta colunas respectivamente.

$$A = \begin{bmatrix} 0,090 & 0,091 & 0,086 & 0,037 & 0,308 \\ 0,537 & 0,545 & 0,686 & 0,296 & 0,308 \\ 0,179 & 0,136 & 0,171 & 0,444 & 0,308 \\ 0,179 & 0,136 & 0,029 & 0,074 & 0,026 \\ 0,015 & 0,091 & 0,029 & 0,148 & 0,051 \end{bmatrix}$$

Através do *software Wolfram-Alpha*®, é possível calcular os autovalores e autovetores das matrizes de criticidade e prioridade relativa. A partir do cálculo de autovalores e autovetores de uma matriz, tem-se várias propriedades que podem ser analisadas nesse trabalho. Considerando uma matriz quadrada, como a supracitada, o escalar real λ é um autovalor associado a um autovetor $v \neq 0$ se $Av = \lambda v$ e pode ser calculado através das raízes dos polinômios característicos de A (Roehrs; Furlan e Quadros 2018).

Autoridade de domínio, melhor opção de escolha e desempenho, e avaliação de competência são exemplos do que o uso desse cálculo engloba. Neste estudo, optou-se por realizar o cálculo exato dos autovetores e autovalores, uma vez que aproximações por médias

aritméticas, geométricas, algébricas ou harmônicas, propagam erros de aproximação. Estes erros podem ser validados no cálculo da razão de consistência e resultar em uma análise incoerente.

A matriz A, que se encontra normalizada e pareada, será utilizada para o cálculo exato dos autovetores v_i e dos autovalores λ_i por meio da Equação 1. Uma vez que se obtenha os valores de λ , torna-se possível criar um vetor coluna onde, cada valor de λ_i representa um autovalor da matriz de criticidade. Este processo é realizado por meio da soma das notas da coluna e, em seguida, divide-se os elementos da mesma pela soma, após a divisão de todos os elementos é feita a soma dos novos valores, mas desta vez soma-se os valores da linha, assim tem-se o vetor prioridade que é o peso que cada critério recebe. No método AHP este vetor coluna deve ser utilizado como o vetor de pesos (Hwang, 1981).

$$\lambda_i = \begin{bmatrix} 0,102 \\ 0,519 \\ 0,197 \\ 0,106 \\ 0,076 \end{bmatrix}$$

Para construir as 5 matrizes de prioridades relativas, utiliza-se das Equações 5 e 11 em conjunto com as Tabelas 2, 3 e 4 que representam os critérios de estabilidade operacional, vazão de produção, eficiência de produção, desperdício de insumos e operacionalidade. Ao final desta etapa, utiliza-se do autovalor máximo (λ_{max}) para identificar os autovetores associados aos λ_{max} de cada matriz de prioridade relativa que dão origem à matriz de decisão D.

$$D = \begin{bmatrix} 0,213 & 0,250 & 0,287 & 0,284 & 0,191 \\ 0,320 & 0,242 & 0,219 & 0,237 & 0,251 \\ 0,267 & 0,267 & 0,218 & 0,263 & 0,325 \\ 0,200 & 0,242 & 0,276 & 0,261 & 0,233 \end{bmatrix}$$

Uma vez que se obtém a matriz D de autovetores, realiza-se o produto desta matriz com o vetor coluna λ_i de autovalores, denominado de vetor pesos, que advém da matriz de criticidade A, de acordo com a Equação 12:

$$R = \lambda D \quad (12)$$

O resultado obtido por este produto é o vetor coluna R que contém um valor numérico que representa o grau de adequação para partir e operar cada unidade de processamento. Ao ordenar R, conclui-se o sequenciamento de partida e operação adequado, onde a UPGN A

possui o resultado de 0,253 enquanto a UPGN B encontra-se com 0,245 e assim sucessivamente.

$$R = \begin{bmatrix} 0,253 \\ 0,245 \\ 0,261 \\ 0,241 \end{bmatrix}$$

Vale ressaltar a proximidade numérica dos valores obtidos na matriz R e destaca-se a necessidade dos cálculos dos autovetores e autovalores exatos, a fim de mitigar a propagação de erros causados pela aproximação das médias.

5. Análise do Resultado

Análise do resultado do método AHP mostra que a UPGN C é a melhor escolha para iniciar o sequenciamento de partida e operação de acordo com os critérios adotados. Os resultados apresentados pelo método AHP encontram-se com valores numéricos estritamente próximos, caracterizando uma pequena **diferença relativa** entre a UPGN C com 0,261 e a UPGN A com 0,253 na ordem de 3,1%.

A aplicação do método AHP permite diferenciar a melhor UPGN (C) da pior UPGN (D), com uma diferença relativa (margem de decisão) de 8,2%. Esta margem de decisão influencia na confiabilidade da escolha, onde o gestor pode refutar a análise AHP por considerá-la inconclusiva, devido à proximidade dos resultados que reflete ambiguidade. A Tabela 6 representa o *ranking* do sequenciamento de partida e operação pelo método AHP para tomada de decisão.

Tabela 6 - Sequenciamento de partida das UPGN's

UPGN	Resultado	Ranking
UPGN A	0,253	2
UPGN B	0,245	3
UPGN C	0,261	1
UPGN D	0,241	4

6. Conclusão

O sequenciamento de partida e operação das unidades de processamento de gás natural (UPGN's), deve ser otimizado de acordo com os princípios da produção enxuta, pois trata-se do ordenamento ideal referente à operação de instalações industriais inseridas na matriz

energética nacional. Com este estudo torna-se possível desenvolver um modelo de comportamento, que identifica as características de cada unidade e obtém informações de desempenho e eficiência, que podem ser utilizadas em outras abordagens, como manutenção e investimento.

Para definição do sequenciamento de partida e operação das UPGN's, este trabalho desenvolve o método de análise multicritério Analytic Hierarchy Process (AHP). Este método tem como finalidade a resolução de problemas multivariáveis que envolvem escolhas de múltiplas alternativas. Este método aponta que o sequenciamento de partida das UPGN's deve iniciar pela unidade C, em seguida deve-se optar pela realização da partida e operação da UPGN A.

O uso do método AHP para a definição da UPGN mais eficiente, UPGN C, tornou-se uma ferramenta imprescindível, haja vista que a interpretação dos cálculos efetuados de estabilidade operacional, vazão de produção, eficiência de produção, desperdício de insumo e operacionalidade evidenciaram a melhor possibilidade de escolha, considerando desempenho e eficiência e comparando qualitativamente cada UPGN. A vantagem do método AHP foi a ponderação desses dados para efetuar a melhores opções de escolhas, mesmo em um sistema multivariável, com quatro UPGN's.

A pequena diferença relativa dos resultados obtidos no método AHP, reflete na ambiguidade da avaliação do especialista, pois neste artigo calculou-se os autovalores e autovetores exatos com a finalidade de que os erros de aproximação pelo cálculo de médias não fossem propagados e ficasse evidente que toda a análise se baseou nas ponderações do especialista.

Entende-se que o método AHP apresenta ambiguidade na escolha entre a segunda e terceira UPGN, dentro do sequenciamento de partida e operação. Observa-se que o sequenciamento indicado pelo método AHP deve ser C, A, B e D, com uma margem de decisão de 3,1% entre as unidades A e C, o que reflete ambiguidade da decisão. Porém, ao abordar unidades de processamento com capacidades de produção na ordem de milhões de metros cúbicos diários, tal diferença representa um volume de insumo considerável, ainda assim, o tomador de decisão pode não se sentir confortável em seguir a análise e resultado do método, o que é compreensível tendo em vista a ambiguidade supracitada.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a consulta de um segundo especialista que pondere uma nova matriz de criticidade (A') para o método AHP, com a

finalidade de realizar uma nova análise e comparar com resultado apresentado neste trabalho e avaliar a possível ambiguidade dos resultados.

Um artigo que foi desenvolvido pelos autores deste trabalho, encontra-se publicado e apresenta a aplicação de uma metodologia de cálculo de entropia da informação da matriz de criticidade (A) e compara com os resultados do método AHP deste trabalho. Este artigo tem como finalidade reduzir a influência cognitiva do especialista na análise multicritério.

7. Referências Bibliográficas

- Almeida, A.Teixeira de et al. (2016). A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff. *European Journal of operational research*.
- Bornia, AC; Wernke, R. (2001). A contabilidade gerencial e os métodos multicriteriais. *Revista Contabilidade & Finanças*. FIPECAPI – FEA – USP. 14 (25): 60- 71
- Bhamu, J., & Singh Sangwan, K. (2014). Lean manufacturing: literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management*, 34 (7): 876-940.
- Bronzatti, Fabricio Luiz; Iarozinski, N.A. (2008). Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*.
- Colin, Emerson Carlos. (2017). Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas. *Livros Técnicos e Científicos*.
- De Oliveira, D. M. (2019). Análise das tecnologias de processamento de gás natural/Analysis of natural gas processing technologies. *Brazilian Journal of Development*, 5 (7): 8603-8607.
- Domeneghini, E.C. (2015). *Proposta de índice de eficiência energética baseado na exergia para UPGN*.
- Ensslin, L; et al. (2010). Avaliação do desempenho de empresas terceirizadas com o uso da metodologia multicritério de apoio à decisão-constructivista. *Pesquisa Operacional*
- Faria, D.G. (2011). *Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica (AHP)*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Fortuna, L. et al. (2005). Soft sensors for product quality monitoring in debutanizer distillation columns. *Control Engineering Practice*.
- Ho, William; Ma, Xin. (2018). The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 267 (2): 399-414.
- Hwang, Ching-Lai; Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. In: *Multiple attribute decision making*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Iañez, M.M. Cunha, C. B. (2006). Uma metodologia para a seleção de um provedor de serviços logísticos. *Production*.
- Kidney, A.J.; Parrish, W.R.; McCartney, D.G. (2011). *Fundamentals of natural gas processing*. CRC press.
- Marins, C. S., et al. (2006). *A metodologia de multicritério como ferramenta para a tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso*. GEPROS
- Marins, C. S.; Souza, D. O.; Barros, M. S. (2009). *O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso*. XLI SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Porto Seguro: Bahia.
- Marodin, G.A. Saurim, T.A. (2013). Implementing lean production systems: research areas and opportunities for future studies. *International Journal of Production Research*.
- Ribeiro, M. C. D. C. R., & da Silva Alves, A. (2016). Aplicação do método Analytic Hierarchy Process (AHP) com a mensuração absoluta num problema de seleção qualitativa. *Sistemas & Gestão*, 11 (3): 270-281.

- Roehrs, M., Furlan, L. M., & de Quadros, G. R. (2018). Eigenvalues and eigenvectors: use on classification of relevance. *Ciência e Natura*, 40: 255-266.
- Saaty, T.L. (2013). *Analytic network process*. Springer US.
- Saaty, T.L. (1991). *Método de Análise Hierárquica*, Livro, São Paulo, Editora Makron.
- Salomon, V.A.P. (2004). *Desempenho da modelagem do auxílio à decisão por múltiplos critérios na análise do planejamento e controle da produção*. Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Santos, M., et al. (2010). Utilização do Analytic Hierarchy Process (AHP) e do Método Borda para modelagem e estruturação de uma ferramenta de seleção de novos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na mineradora VALE S.A. *Indústria 4.0 e o uso de tecnologias digitais*.
- Schmoldt, D., Kangas, J., Mendoza, G. A., & Pesonen, M. (Eds.). (2013). *The analytic hierarchy process in natural resource and environmental decision making* (Vol. 3). Springer Science & Business Media.
- Silva, L.A.T. (2013) Controle avançado de uma unidade de processamento de gás natural. *RUnPetro-ISSN 2316-6681*.
- Slack, N.A., Chambers, S.A.; Johnston, R. (2009). *Administração da Produção*. 2aed. São Paulo: Atlas.
- Thomas, J. E. (2004). Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2ª edição. *Editora Interciência*.
- Tolmasquim, M.T.; Guerreiro, A., Gorini, R. (2007). Matriz energética brasileira: uma prospectiva. *Novos estudos CEBRAP*.
- Tortorella, G. L., & Fogliatto, F. S. (2014). Method for assessing human resources management practices and organisational learning factors in a company under lean manufacturing implementation. *International Journal of Production Research*, 52(15): 4623-4645.
- Unal, C.; Guner, M. G. (2009). *Selection of ERP using AHP tools in the clothing industry*. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 21 (4): 239-251.
- Wang, Y. J., Xin, Q., & Coenen, F. (2008). Mining efficiently significant classification association rules. In *Data Mining: Foundations and Practice* (pp. 443-467). Springer, Berlin, Heidelberg.