

ESTADO DA ARTE NA PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS QUE OPERAM COM MÁQUINAS EM PARALELO.

Hugo da Silva Guimarães Universidade Federal Fluminense (UFF) hugosguima@gmail.com

Edwin Benito Mitacc Meza Universidade Federal Fluminense (UFF)

emitacc@gmail.com

Danilo Artigas Universidade Federal Fluminense (UFF)

daniloartigas@gmail.com

Dalessandro Soares Vianna Universidade Federal Fluminense (UFF)

dalessandrosoares@yahoo.com.br

Resumo

Na indústria é comum que hajam perdas de produção por falhas em equipamentos, mesmo quando existem máquinas que estão preparadas para realizarem funções idênticas e operar paralelamente entre si, quando se trata de equipamentos voltados para a área de óleo e gás, estes danos podem ir além dos materiais e financeiros, gerando inclusive perdas humanas, para evitar falhas de programação da manutenção e de operação, alguns autores tem estudado as possibilidades de redução de indisponibilidade de máquinas que operam em paralelo aplicando técnicas variadas e obtendo soluções aplicáveis em todos os segmentos da indústria, este trabalho apresenta o estado da arte dos estudos de programação da manutenção e operação na indústria.

Palavras chave: manutenção; programação; paralelismo; compressão.

1. Introdução

A manutenção de máquinas é uma tarefa crítica na indústria em geral, podendo elevar muito os custos de produção e até inviabilizar uma unidade de produção, segundo Wang, Chu, e Mao, (2008), o custo de manutenção pode atingir entre 15% e 70% dos custos de produção. Kobbacy e Murthy (2008) observa que ainda existe um grande potencial para aumentar a produtividade nas práticas atuais de manutenção.

O planejamento das campanhas de manutenção é a atividade crucial para que se mantenha a produtividade nas indústrias e as consequências das falhas nesta podem ter grandes proporções, gerando perdas de materiais, produção, equipamentos e financeiras, que podem gerar consequências como o aumento de custo e redução da capacidade de produção, incapacidade de investimentos

As manutenções podem ser de diversas naturezas, como corretivas, preventivas, preditivas, detectivas, manutenção baseada na condição, manutenção produtiva total (TPM), entre outras, a partir da escolha do tipo de manutenção a ser empregada na planta é que se define qual será o foco da produção, que pode ser visando a operação, a manutenção ou ambos, a partir destes enfoques se definem a programação da manutenção e operação de um conjunto de máquinas paralelas em um sistema produtivo industrial.

Mesmo com tantos recursos empenhados na administração da produção e manutenção sempre há como melhorar a alocação de recursos para a realização de uma operação e manutenção em uma unidade de produção, aproximando todo o sistema de seu ponto de operação ótimo. Como exemplo na cadeia de produção de petróleo e gás os custos de manutenção podem ser superlativos podendo gerar prejuízos incalculáveis, inviabilizando o negócio e refletindo nos preços dos produtos utilizados pelo consumidor final e de maneira direta nas margens de lucro das empresas.

Nesta indústria, particularmente, existem variadas máquinas e equipamentos, e nela é amplamente aplicada a utilização das turbinas a gás, estes equipamentos de alta tecnologia e aplicação muito versátil são extremamente importantes para os processos de exploração, produção e refino de petróleo e gás. As turbinas a gás geralmente são aplicadas na geração de energia elétrica em plataformas petrolíferas e campos de produção sem fornecimento de energia elétrica por concessionária e ainda mais na compressão de gás natural processado ou não.

2. O paralelismo de máquinas

O grande problema de em uma unidade que utiliza turbinas a gás pode ser a ausência de uma programação da manutenção eficiente, neste caso se uma máquina falhar ou precisar passar por manutenções, é necessário que haja uma outra em seu lugar para desempenhar sua função. Guimarães *et al*, (2018) descrevem em um trabalho um modelo matemático que contempla a programação de manutenção com ênfase na operação em uma estação de compressão (ECOMP) com seis turbinas a gás operando em paralelo, determinando os exatos momentos das suas principais manutenções sem afetar a produção.

A presente pesquisa se destina a localizar e compilar o que há nos trabalhos publicados sobre otimização e programação de parada de máquinas na compressão de gás natural por meio de gasodutos. A iniciativa desta pesquisa é a procura de melhoria da operação e manutenção de turbinas a gás, foram pesquisados trabalhos que apresentaram a possibilidade de escalonamento de operação com uma programação de manutenção em oficina, independentemente da aplicação das máquinas paralelas.

Os trabalhos selecionados demonstram como foram aplicadas as diversas técnicas para determinar que máquinas devem operar até o seu limite de manutenções, sem comprometer suas funções, demonstram ainda como melhorar as manutenções, reduzindo tempo e custos, servindo de subsidio para a tomada de decisões em plantas industriais.

3. Metodologia

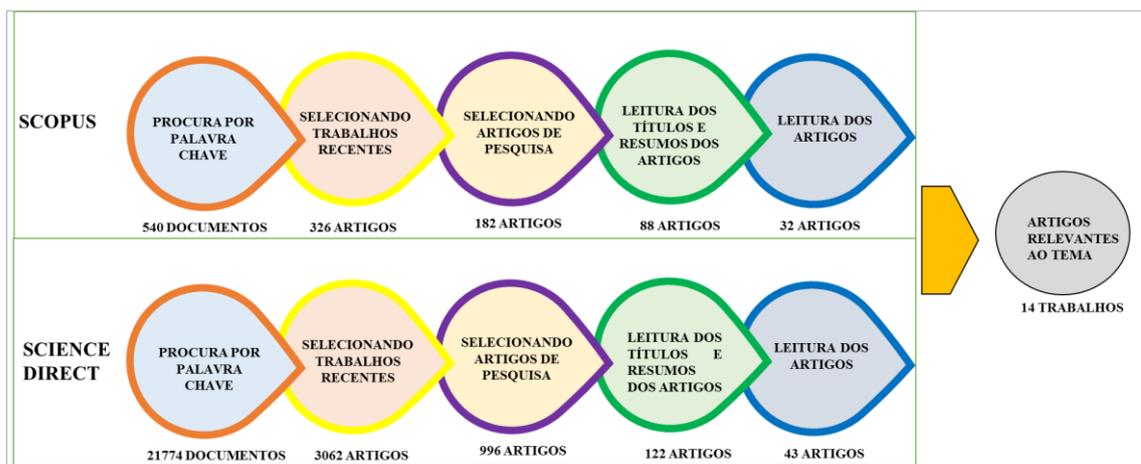
Este trabalho busca a identificação de trabalhos relacionados a operação e manutenção de máquinas rotativas em um sistema de operação paralela, onde podem ocorrer casos no qual as máquinas podem operar simultaneamente ou não, sendo que nunca terão suas manutenções realizadas ao mesmo tempo.

Para efetivar a pesquisa, foram definidas as palavras chave *scheduling, parallel, compressor, operation, maintenance* e foram realizadas buscas de trabalhos no *Scopus* e *Scimedirect*, gerando os resultados a partir de 1999 e excluídos de resultados duplicados, após aplicação dos filtros obteve-se os resultados demonstrados na Figura 1.

Os trabalhos resultantes após a aplicação dos filtros seguiram uma metodologia de pesquisa como apresentada abaixo:

- Áreas de pesquisa irrelevantes no tema como medicina, ciências sociais e artes foram excluídas, atendo-se apenas as áreas de engenharias, e matemática.
- Leitura de títulos, resumos e conclusões e enfatizando nas pesquisas os trabalhos que apresentam alguma ligação com a área de operação de sistemas e/ou manutenção, programação da produção e otimização, o que não apresentou nenhuma dessas características foram excluídos da pesquisa.
- Literatura do inteiro teor do trabalho a fim de identificar as áreas de atuação, os métodos de programação e suas metodologias que geralmente são descritas na seção de metodologia do respectivo trabalho.

Figura 1 - Metodologia aplicada na pesquisa



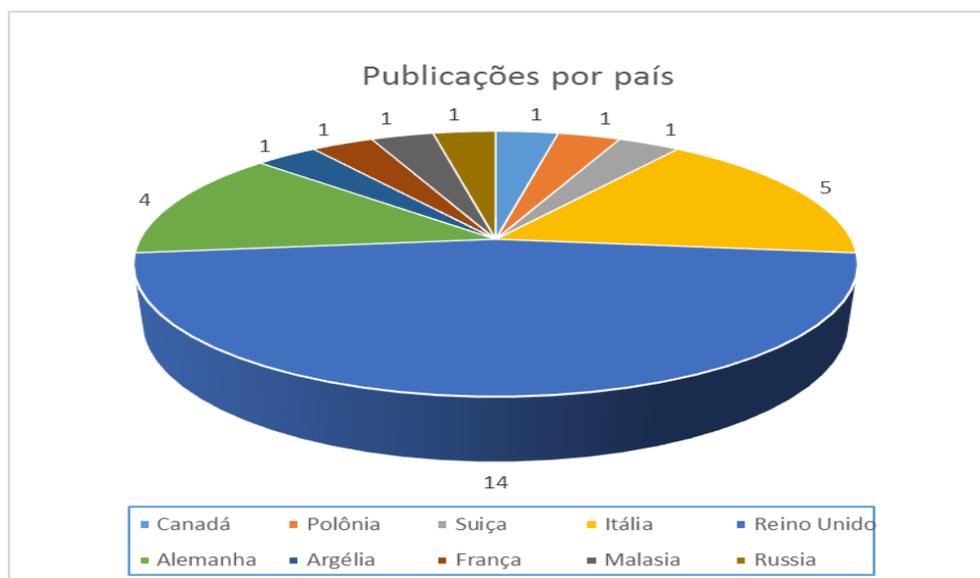
Fonte: Autor (2018)

Os autores que se dedicam aos estudos relacionados a programação da manutenção e operação de equipamentos paralelos ou *back up* tem avançado na definição de métodos de para seleção das máquinas para realização de atividades sem comprometer a produtividade e os recursos da indústria que aplicam seus métodos. Os artigos apresentados neste trabalho foram estudados e expõem soluções para as atividades de programação de manutenção e operação de máquinas, estes autores são: Kostowski et al (2015); Cortinovis et al (2016); Xenos et al (2016); Laggoune, Chateauneuf e Aissani (2009); Xenos et al (2015); Salamat (2012); Zulkafli e Kopanos (2016); Silva et al (2018); Nguyen et al (2018), Bohlin et al (2010), Sabuncuoglu e Bayiz, (1998); Li e Nilkitsaranont (2009); Mellouli et al (2009); Sun e Li (2010).

4. Análise dos artigos

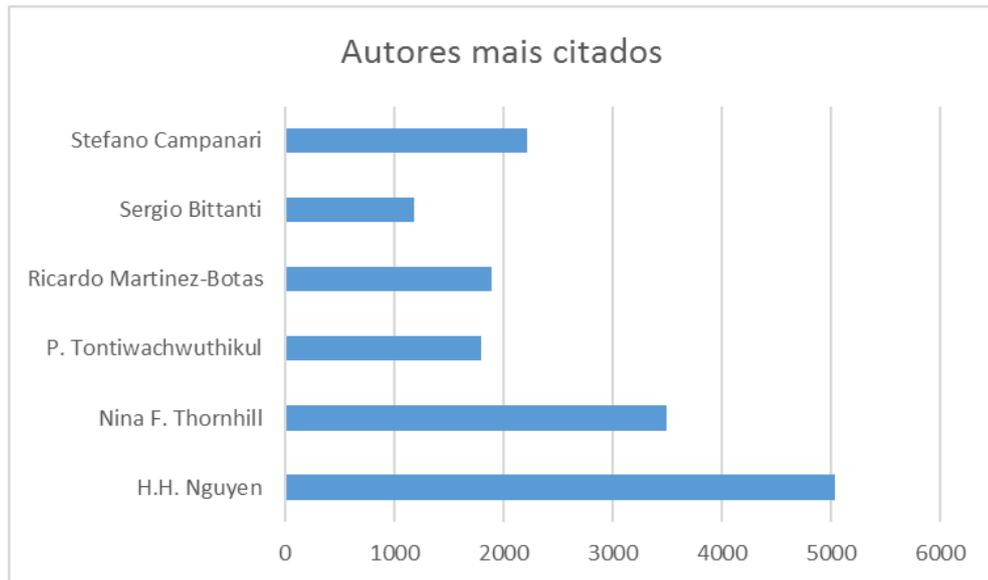
Todos os trabalhos da pesquisa foram publicados a partir de 1998, e se baseiam principalmente em programação de manutenções em unidades operacionais da área química, transporte de derivados de petróleo, em todas eles são aplicadas técnicas de simulação como ferramenta para a resolução do problema ou para auxílio na tomada de decisão. Os países com autores que mais publicaram artigos foram o Reino Unido com 14 artigos, Itália com 5 artigos e Alemanha com 4 artigos, os demais autores publicaram apenas 1 artigo cada, a Figura 2 apresenta as quantidades de publicações por países, a Figura 3 apresenta os autores mais citados.

Figura 2 - Divisão de publicações por país



Fonte: Autor (2018)

Figura 3 - Autores mais citados

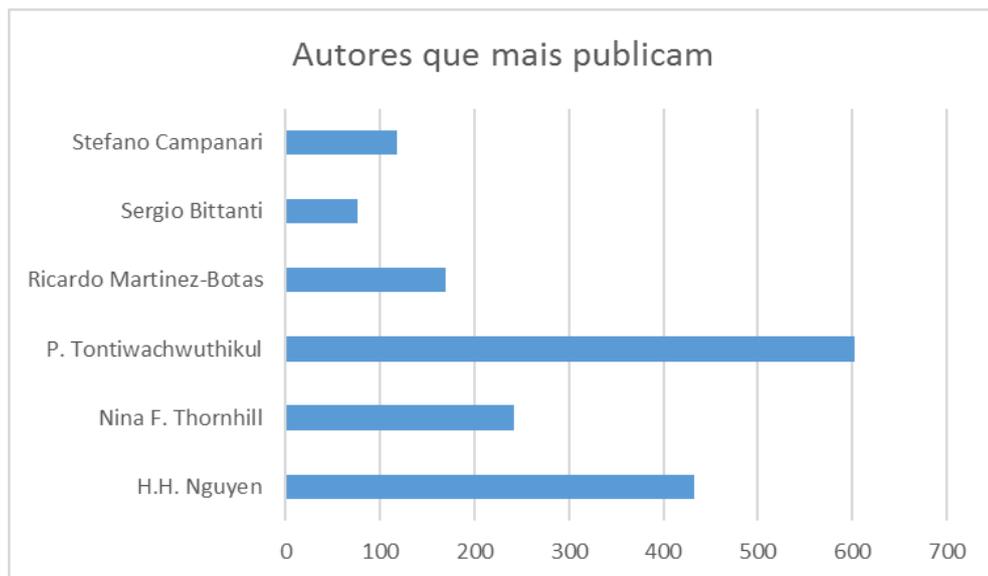


Fonte: Autor (2018)

É possível perceber que o Canadá possui maior número de autores com publicações nesta área de pesquisa, sendo o número de autores muito superior aos autores de outras nacionalidades.

Os autores mais influentes são Nguyen e Tontiwachwuthikul da *University of Regina* no Canadá, Thornhill e Martinez-Botas do *Imperial College London* no Reino Unido, Tontiwachwuthikul, Bittanti Stefano Campanari do Politecnico di Milano, na Itália; estes autores se destacam pelo alto volume de publicações de artigos como mostra a Figura 4.

Figura 1 - Autores com mais publicações



Fonte: Autor (2018)

5. Revisão dos artigos

Os artigos selecionados para este trabalho demonstram que podem existir diversas áreas de aplicação, estratégias e focos de técnicas para a determinação das melhorias de operação e manutenção, redução de custos e energia, dependendo da área de estudo, ressalta-se que cada autor estudou unidades diferentes, com funções similares, onde o interesse comum é sobretudo o planejamento de manutenção e/ou operação de máquinas dispostas paralelamente entre si, minimizando as perdas por falta de equipamentos a processarem suas atividades requeridas.

5.1 Áreas de aplicação

Os estudos relacionados a programação de manutenção e operação na literatura apresentam vertentes variadas dependendo da área que se deseja estudar, estes trabalhos são conduzidos de acordo com a estrutura que se deseja analisar, suas particularidades e principalmente com o resultado que se deseja obter após a conclusão do estudo, mas em geral se estudam as áreas de produção de linhas de produção, ou seja, as indústrias que utilizam máquinas para produzir produtos, como uma fábrica de peças para automóveis. Outro ponto de pesquisas são as unidades de processo que servem de auxílio para outras finalidades, como estações de compressão, sistemas de bombeio, unidades de ar comprimido e outras.

Em relação aos trabalhos de programação de manutenção e operação de máquinas, a literatura é bastante vasta quando se trata de máquinas de produção de bens de consumo que operam em unidades fabris de bens de consumo, Sabuncuoglu e Bayiz, (1998) apresentam um sistema de programação de operação de máquinas em uma unidade fabril que leva em consideração o *makespan*, este conceito de programação não é o mais adequado aos que se apresentam nos trabalhos relacionados a produção contínua e ininterrupta, como no caso de compressão de gases em dutos. Sun e Li (2010) também estudam a redução do *makespan* em unidades fabris, em seu trabalho são apresentadas alternativas de programação de manutenção de máquinas paralelas e idênticas, sem preferências em operação.

Ressalta-se a pequena produção de estudos voltados para a área de operações paralelas de máquinas como bombas, turbinas a gás e moto compressores na programação de manutenção e os artigos dos principais autores que estão ligados a áreas de pesquisas voltadas a operação de máquinas que operam paralelamente entre si na produção de insumos ou como auxiliares a indústria apresentam soluções diversas, como no trabalho de Nguyen et al (2008) que estudam a implantação da automatização de duas estações de compressão em locais diferentes, onde uma estação possui três compressores e a outra apenas dois compressores que operam em

paralelo, a questão deste trabalho é como suprir os clientes operando as máquinas de cada estação em paralelo levando em consideração as variações de demanda e períodos de manutenção; Cortinovis et al (2016) apresentam uma formulação de problema para otimização do compartilhamento de carga de compressores (*load sharing*) em uma estação de compressão com dez máquinas dispostas paralelamente, além de um novo método de rastreamento das características de desempenho de compressores de gás utilizando modelos termodinâmicos e dados históricos de operação, neste trabalho o foco é a economia de máquinas em operação e não as suas manutenções, o paralelismo das máquinas são úteis apenas para a divisão de carga e não para ciclos de manutenção, visto que a premissa é que os turbo compressores possuam ciclos de manutenção diferentes.

Xenos et al (2016) conduzem seu artigo a energia aplicada, estudando o sistema de compressão em paralelo em uma planta industrial, abordando um sistema de divisão de carga e escalonamento de compressores, já Silva et al (2018), mostram uma solução para uma estação de compressão com três turbo compressores em paralelo, onde a proposta é aumentar a sua capacidade de operação através de uma solução trigerativa, como apoio as decisões qual máquina operar foi modelado um esquema de operação de máquinas de maneira alternada para que haja disponibilidade de máquinas a operar quando houver manutenções em alguma delas. Alguns autores exploram seus estudos em diversas abordagens, como pode ser visualizados no trabalho de Zulkafli e Kopanos (2016) apresenta um estudo de manutenção baseada na condição em um sistema composto por onze compressores de ar dispostos paralelamente para um sistema de utilidades em um unidade de processamento; Salamat (2012) expõe um estudo de manutenção preditiva em turbo compressores, em seu trabalho é desenvolvido um algoritmo que analisa o desempenho de máquinas onde é possível afirmar o nível de incrustações e sujeiras acumuladas nas “pás” dos compressores e turbinas sem que seja necessário o desligamento das mesmas, é discutido também como este tipo de situação pode interferir na performance destes equipamentos, gerando perdas de produção e falhas de operação, o objetivo deste trabalho é definir o momento da manutenção de turbo compressores, podendo ser muito útil em sistemas de operação paralelos.

Kostowisky et al (2015), apresentam em seu trabalho uma visão detalhada sobre o gerenciamento de energia de uma estação de compressão, onde o foco é a realização de hipóteses onde as turbinas operam por determinados períodos de tempo e produzem eletricidade com um sistema de cogeração e ciclo combinado, assim alimentando seus sistemas e vendendo a energia elétrica excedente, além deste são propostos sistemas de aquecimento para o

funcionamento dos sistemas auxiliares das máquinas, o ponto de vista deste trabalho usa uma base os dados de operação e intervalos que as máquinas ficaram inoperantes e consideram os tempos de disponibilidades médios anuais. Mellouli et al (2009), descrevem o comportamento de máquinas paralelas com funções idênticas que realizam as tarefas paralelamente em um sistema genérico e como podem ser programadas as manutenções considerando eventos estocásticos, como uma quebra não prevista de algum equipamento, e eventos determinísticos, como uma manutenção programada que deixará a máquina fora de operação por um determinado período.

Li e Nilkitsaranont (2009) estudaram uma turbina a gás em uma unidade de produção de óleo e gás, analisando o tempo de operação remanescente da mesma até seu próximo *overhaul*, baseando-se em seus dados históricos, relativizando as suas manutenções assim tornou-se possível programar a manutenção da máquina baseada em sua condição, embora o modelo é utilizado para prever a manutenção de uma única turbina, difícil é possível projetar este modelo aplicado em uma estação de compressão com diversas máquinas, respeitando-se restrições específicas e abordando a política de revezamento de manutenções e operações a fim de se manter o processo em equilíbrio, otimizando os custos as ECOMP.

Laggoune, Chateaneuf e Aissani (2009) desenvolvem um plano de manutenção variado em multicomponentes de um compressor centrifugo acionado por turbina a vapor em uma refinaria de petróleo, esta manutenção pode ser preventiva, corretiva ou oportunista a depender da situação. M. Bohlin et al (2010) descrevem o desenvolvimento e implantação de uma ferramenta de planejamento de manutenção baseada em oportunidade em uma oficina de um fabricante de turbinas a gás, com o objetivo de programar as manutenções das máquinas que são recebidas dos clientes e entrega-las em um prazo menor.

Xenos et al (2015) mostram o estado da arte em planejamento de operações e manutenções em compressores de ar para unidades de produção em uma planta química de energia e apresentam estudos com escalonamento ótimo de operação e manutenção, com redução de consumo de energia.

5.2 Estratégias de manutenção

A literatura apresenta várias linhas de pesquisa, nos trabalhos pesquisados foram verificadas essa amplitude desde a programação de manutenção em máquinas que operam em paralelo a redução de tempo de manutenção de máquinas em oficina, devido as diversas metodologias aplicadas nos trabalhos pesquisados, foi necessário dividi-los em trabalhos voltados para

manutenção, operação e ambos, assim foi obtido o total de publicações por área e sua representatividade na pesquisa, a Figura 5 apresenta a divisão dos dados.

Figura 5 - Divisão dos trabalhos



Fonte: Autor (2018)

Os trabalhos de manutenção focam exclusivamente nesta área, não apresentando grandes preocupações relacionadas a operação dos equipamentos, seu objetivo baseia-se na programação da manutenção, diferentemente das publicações que focam em operação, onde a operação das máquinas é o principal alvo destes, nestes trabalhos há ainda a questão da manutenção da produção, isto em um sentido de se manter a produção como objetivo da operação, deixando para o segundo plano a manutenção do equipamento. Quatro trabalhos apresentam uma pesquisa integrada entre manutenção e operação, estes demonstram sobretudo a necessidade de se manter um nível de produção levando em consideração a necessidade da manutenção, sempre com a aplicação de um sistema que viabiliza a retirada de máquinas de operação com uma mínima intervenção na operação destas.

5.3 Técnicas utilizadas

As técnicas utilizadas nos trabalhos da pesquisa, demonstram as preferências dos autores de acordo com os problemas pesquisados. Neste quesito os autores apresentaram a aplicação de nove técnicas para a solução dos diferentes problemas, onde cada uma destas leva aos resultados finais de cada trabalho.

Os autores que utilizaram algum software de simulação para realização dos trabalhos foram Cortinovis et al (2016); Xenos et al (2015); Li e Nilkitsaranont (2009); Laggoune, Chateauneuf e Aissani (2009); Bohlin et al (2010). Para Xenos et al (2015); Nguyen et al (2008) e Bohlin et al (2010) foi necessário a utilização de ferramentas matemáticas de programação com

MATLAB ou CPLEX. Xenos et al (2015); Xenos et al (2016); Zulkafli, e Kopanos (2016); Nguyen et al (2008); Mellouli et al (2009) lançaram mão da programação linear inteira mista. Salamat (2012; Li e Nilkitsaranont (2009) aplicaram a técnica da análise do caminho do gás (GPA).

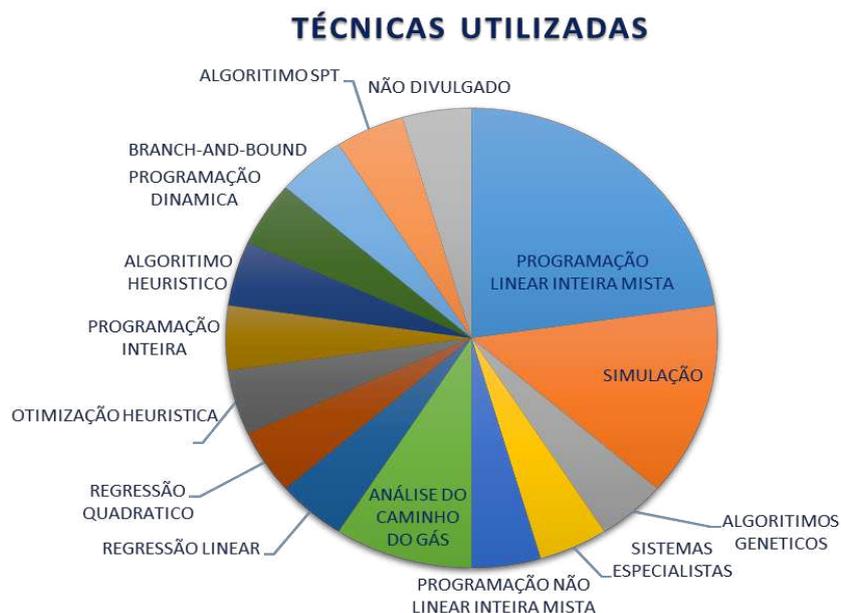
Alguns artigos aplicaram ou desenvolveram heurísticas e algoritmos e as utilizaram como apoio na solução que buscavam, podendo ser para desenvolver soluções iniciais ou mesmo na resolução direta das questões estudadas, no trabalho os exemplos são Silva et al (2018); Sabuncuoglu e Bayiz (2018); Bohlin et al (2010); Sun e Li (2010).

Mellouli et al (2009), utilizou a programação dinâmica e o método *branch-and-bound* em algumas etapas do artigo, Nguyen et al (2008) além da programação linear inteira mista, efetuou testes com algoritmos genéticos e sistemas especialistas, onde os resultados foram difusos, Li e Nilkitsaranont (2009) empregou a regressão linear e a regressão quadrática em etapas intermediárias da problematização do sistema e assim foi possível aplicar as técnicas diagnósticas e prognósticas nas turbinas a gás.

Bohlin et al (2010) aproveitou-se da programação inteira na pesquisa, Cortinovis et al (2016) desenvolve sua pesquisa com a técnica de programação não linear inteira mista e Kostowski et al (2015) não divulgou a técnica utilizada em sua pesquisa.

A Figura 6 apresenta a divisão de técnicas, onde é possível afirmar que a mais utilizada foi a Programação Linear Inteira Mista (PLIM), esta técnica aparece na maioria dos trabalhos e é representativa devido as características dos trabalhos que as utilizaram, seus autores atuaram no sentido de solucionar o problema central de programação de operação e manutenção em instalações onde existem mais de uma máquina que operam em paralelo.

Figura 6 - Técnicas mais encontradas na pesquisa



Fonte: Autor (2018)

Ressalta-se também a segunda técnica mais utilizada, nesta pesquisa a simulação apareceu em dois trabalhos, aparentemente parece ser uma participação pequena, porém somente foi levada em consideração que a técnica de simulação foi utilizada para alcançar o objetivo do trabalho, quando a mesma foi a responsável pelo resultado, ou seja, quando a mesma não foi utilizada apenas como apoio para a utilização de outras técnicas. As demais técnicas apareceram apenas uma vez cada uma.

6. Considerações finais

A operação de máquinas deve ser realizada de maneira em que a sua manutenção seja minimizada, por outro viés deve-se realizar manutenções com eficiência gerando o menor tempo de parada dos equipamentos, e este deve ser o papel desta dupla na indústria.

O objetivo deste trabalho foi apresentar os trabalhos que estão sendo desenvolvidos na área de programação de manutenção de máquinas paralelas e suas operações, sem que haja perdas significativas de qualquer natureza, nesta pesquisa foi apresentado o estado da arte dos estudos relevantes nesta área, embora sejam escassos, há uma oportunidade de desenvolver a partir destes outros trabalhos que abordem outros aspectos e equipamentos não contemplados atualmente.

Observa-se que há uma preocupação nos autores em resolver os problemas da indústria com diferentes técnicas, algumas pouco difundidas ou desenvolvidas e adaptadas para este tipo de

problema, em um trabalho futuro será possível a investigação aprofundada destas técnicas a fim de explorá-las e determinar sua eficácia para outros problemas.

REFERÊNCIAS

- BOHLIN, Markus et al. Searching for Gas Turbine Maintenance Schedules. **Artificial Intelligence Magazine**, v. 31, p. 21 - 36, 2010.
- CORTINOVIS, Andrea et al. Online performance tracking and load sharing optimization for parallel operation of gas compressors – **Computer and Chemical Engineering**, v. 88, p. 145 - 156, 2016.
- KOBBACY, K. e MURTHY, D. **Complex system maintenance handbook**. London: Springer, p.111 - 131, 2008.
- KOSTOWSKI, Wojciech J. et al. Energy and exergy recovery in a natural gas compressor station – A technical and economic analysis, **Energy Conversion and Management**, v. 104, p. 17 – 31, 2015.
- LAGGOUNE, Radouane, CHATEAUNEUF, Alaa e AISSANI, Djamil. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. **Computer and Chemical Engineering**, v. 33, p. 1499 - 1510, 2009.
- LI, Y. G. e NILKITSARANONT, P. Gas turbine performance prognostic for condition-based maintenance. **Applied Energy**, v. 86, p. 2152 - 2161, 2009.
- MELLOULI, Racem et al. Identical parallel-machine scheduling under availability constraints to minimize the sum of completion times. **European Journal of Operational Research**, v. 197, p. 1150 - 1165, 2009.
- NGUYEN, H. H. et al. A Comparison Automation Techniques for Optimization Compressor Scheduling. **Advances in Engineering Software**, v. 39, p. 178 - 188, 2008.
- SABUNCUOGLU, I. e BAYIZ, M. Analysis of reactive scheduling problems in a job shop environment - **European Journal of Operational Research**, v. 126, p. 567 - 586, 2000.
- SALAMAT, Reza. Performance modeling of degraded compressors and fault diagnostics. **Society of Petroleum Engineers**, 2012.
- SILVA, Paolo et al. Trigenenerative solution for natural gas compressor stations: A north Italian test case. **Energy**, v. 30, p. 1 - 12, 2018.
- SUN, Kaibiao e LI, Hongxing. Scheduling problems with multiple maintenance activities and non-preemptive jobs on two identical parallel machines - **Int. J. Production Economics**, v. 124, p. 151 - 158, 2010.
- WANG, Ling; CHU, Jian; MAO, Weijie. An optimum condition-based replacement and spare provisioning policy based on Markov chains. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.14, p. 387 - 401, 2008.
- XENOS, Dionysios et al. Optimization of a network of compressors in parallel: Real Time Optimization (RTO) of compressors in chemical plants – An industrial case study - **Applied Energy**, v. 144, p. 51 - 63, 2015.
- XENOS, Dionysios et al. Operational Optimization of Networks of Compressors Considering Condition-Based Maintenance. **Computers and Chemical Engineering**, v. 64, p. 117 - 131, 2016.
- ZULKAFI, Nur I. e KOPANOS, Georgios M. Planning of production and utility systems under unit performance degradation and alternative resource-constrained cleaning policies. **Applied Energy**, v.183, p. 577 - 602, 2016.