

DOI:10.5748/9788599693131-14CONTECSI/PS-4480

MODELING AND ANALYSIS OF OIL WELLS TEST OF PRODUCTION USING PETRI NETS

Rafael Alison de Souza Holanda (Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rio Grande do Norte, Brasil) – rafaelholanda3105@gmail.com

André Pedro Fernandes Neto (Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rio Grande do Norte, Brasil) – andrepedro@ufersa.edu.br

Gutemberg Soares da Silva (Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil) – guttembbergue@gmail.com

Teófilo Camara Mattozo (Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil) – mattozo@oi.com.br

Collaborator:

Alexandre Henrique Soares de Oliveira Holanda (Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rio Grande do Norte, Brasil) – alexandrehso@gmail.com

The oil well production test is necessary to measure the producing potential of exploration fields. The frequency of the production test is a supervision subject of the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) since it's one of the oil industry activities whose realization generate impact on royalties and tax revenues. By using resources from the studied company, the production test is a critical process that isn't always performed satisfactorily. Therefore the development of a discrete event system model, using Petri Nets was proposed, in order to deeply understand the behavior of the process in question, and lay the groundwork for future research on simulation and automation. To achieve that goal, all the system components and their relations with the steps were described. Then a flowchart that describes the steps was designed to develop the model in Petri Nets. Analysis of the Petri Net were performed in order to confirm the consistency of the developed model. These analyzes consisted in: reduction through net simplification, verification of the available markings, and the confirmation of the presence of the desired properties ("liveness", "boundedness" and "reversibility"). The analyzes of the reduced Petri net demonstrated, by induction, that not only the net obtained the properties, as this has the required descriptive capacity for a real system representation.

Keywords— Petri nets. Oil Wells. Modeling. Discrete Event Systems. Test Production.

1-INTRODUÇÃO

O campo de produção de petróleo está sujeito a diversas variações das suas condições físicas e químicas, em decorrência, tanto da atividade de exploração, quanto das mudanças naturais do meio, ensejando mudanças na capacidade produtiva. Em razão dessa variabilidade de comportamento, e no intuito de diminuir o nível de incerteza sobre a produção de petróleo, as companhias utilizam-se do “teste de produção” que é o método mais simples (e confiável) para verificação do volume produzido por um determinado poço de petróleo, sendo é possível mensurar o potencial de produtividade desse campo de todos os poços de um determinado campo exploratório.

A ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) regulamentou, que um intervalo mínimo entre um teste de produção válidos outro não deve ser superior a 42 dias, ensejando a necessidade de um planejamento para programação dos testes de produção (ANP, 2014). Esse planejamento inclui a seleção diária de quais os poços de produção que deverão ser testados, bem como a ordem de execução desses testes, de modo a potencializar a utilização dos recursos disponíveis e promover a adequação da frequência às normas da ANP. Tendo em vista que este é um processo crítico na companhia, com relação às normas regulamentadas pelos órgãos fiscalizadores, sua análise detalhada e sua profunda compreensão tornam-se notoriamente importantes.

A empresa pesquisada possui várias estações coletoras que recebem as linhas de produção de vários poços. A ANP apresenta uma forte fiscalização nos regimes de exploração das concessionárias quanto ao pagamento de *royalties*, e por isso ela exige testes frequentes de vazão dos poços. Dessa forma é de grande importância que haja uma programação acurada dos testes dos poços, para evitar as possíveis sanções dado o descumprimento de normas vigentes da ANP. Como há uma grande quantidade de poços para serem analisados em um período limitado de tempo e os recursos são limitados para a realização do teste, é importante que, tanto o teste de produção, quanto o sistema que operacionaliza esse processo, sejam avaliados a fim de que suas principais características possam ser identificadas e melhorias possam ser implementadas.

Diversas abordagens para a solução do problema de planejamento dos testes de produção podem ser utilizadas, incluindo o tratamento sob a ótica matemática da pesquisa operacional e a análise estatística por meio de técnicas de simulação. Por se tratar de um sistema composto por elementos cujos eventos podem ser considerados discretos, a metodologia de análise dos sistemas discretos através das redes de Petri torna-se especialmente interessante, uma vez que essa ferramenta proporciona mecanismos de análise efetiva do comportamento do sistema.

Nesse estudo será utilizada a técnica de modelagem de sistemas a eventos discretos em redes de Petri, onde será definido o escopo do sistema a ser modelado, a profundidade de percepção e o nível de detalhamento. Seguindo o método de simulação proposto por Chwif e Medina (2010), a elaboração de modelo de simulação de um sistema discreto foi composto pelas seguintes: concepção do modelo, implementação e análise dos resultados. A modelagem do sistema em redes de Petri seguirá o método de implementação proposto por Cardoso e Valette (1997).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 REDES DE PETRI

As redes de Petri são representações gráficas de modelos matemáticos que normalmente são utilizados para simular e analisar o comportamento de sistemas a eventos discretos, tais como: sistemas de manufatura, de comunicação, de transporte, logísticos, de informação e sistemas a eventos discretos de forma geral, possibilitando a determinação de equações de estado, equações algébricas dentre outros modelos matemáticos que governam o comportamento dos sistemas (HOLANDA, 2012;MURATA,1989).

Por ser uma representação gráfica e matemática, a rede de Petri pode ser descrita e forma algébrica. Algebricamente, segundo Cardoso e Valette (1997), uma rede de Petri R é uma quádrupla:

$$R = (P, T, Pre, Post)$$

Onde:

- P é o conjunto finito de lugares com dimensão n ;
- T é o conjunto finito de transições com dimensão m ;
- $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ é a aplicação de entrada (lugares precedentes ou de incidência anterior), com \mathbb{N} sendo o conjunto dos números naturais;
- $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ é a aplicação de saída (lugares seguintes ou incidência anterior).

As funções de entrada e saída relacionam transições e lugares. A função de entrada é um mapeamento de uma transição a uma coleção de lugares conhecidos como lugares de entrada e a função de saída é um mapeamento de uma transição a uma coleção de lugares conhecidos como lugares de saída. A rede é constituída por lugares (são círculos onde são armazenadas fichas), por transições e por arcos direcionados. A distribuição das fichas nos lugares da rede, é uma marcação que indica o estado corrente da rede de Petri. As transições transferem fichas de um lugar para outro e são associadas a eventos dentro do modelo. Os arcos sempre interligam os lugares às transições e vice-versa, podendo possuir pesos (quantidade de fichas que são consumidos ou gerados).

Uma transição é habilitada quando os lugares de entrada (os lugares que possuem arcos de saída que se ligam à transição) estejam com a quantidade de fichas igual ou superior ao peso dos arcos (Sales, 2002). Quando uma transição é disparada, ela consome uma quantidade de fichas dos lugares de entrada (no mesmo valor do peso dos arcos) e acrescenta fichas aos lugares de saída (lugares que recebem como entrada um arco originado nessa transição), cada uma com seu respectivo peso.

Segundo Marranghello (2005), denomina-se rede marcada a estrutura topológica da rede associada ao conjunto de marcas, ou seja, é a rede com a designação inicial de fichas para os lugares. Para Cardoso e Valette (1997), a limitabilidade, a vivacidade e a reiniciabilidade, são as boas propriedades de uma rede de Petri marcada. Usualmente é desejável que a rede construída, bem como os sistemas a eventos discretos, possuam, simultaneamente, todas essas boas propriedades. Para Lino e Sztajnberg (2007), uma rede é k -limitada se, para todo conjunto das marcações acessíveis M a partir de uma marcação inicial M_0 , o número de fichas em qualquer lugar da rede não exceder k (inteiro). Uma rede é viva quando todas as transições são vivas, ou seja, para toda marcação alcançável, existe uma sequência de disparos tal, que a mesma se torne habilitada, sendo considerada reiniciável quando, para o qualquer marcação do espaço de estados, existir uma sequência de disparos que faça a rede evoluir até a marcação inicial (LINO; SZTAJNBERG, 2007).

Para obter maiores informações sobre o comportamento dinâmico da rede interpretada, é necessário simulá-la, de modo a passo a passo, os valores das variáveis associados às transições. Embora a simulação não ser um método de validação por exaustão, ou seja, um método no qual não é possível testar todas as possibilidades de comportamento para cada uma das configurações possíveis do sistema, é possível analisar o comportamento pelo menos daquelas previstas. A árvore de alcançabilidade ou árvore de cobertura é nome do processo de enumeração das marcações acessíveis que permite decidir se uma rede é k -limitada. Esse processo consiste num algoritmo de verificação conforme descrito por Murata (1989) e Cardoso e Valette (1997), resultando na elaboração um gráfico na forma de ramificações onde os nós correspondem às marcações da rede e os ramos dos nós são as marcações acessíveis a partir desse.

2.2 SISTEMA DE COLETA DE PETRÓLEO

Um poço de petróleo é um conduto para fluxo dos fluidos das formações para a superfície, com o propósito, de produzir hidrocarbonetos em formações subterrâneas, composto de equipamentos utilizados para manter e controlar esse fluxo (Corrêa, 2003). Uma estação coletora é uma instalação industrial responsável pela captação do petróleo de poços produtores em terra de onde o petróleo é bombeado para uma estação coletora de maior capacidade ou; uma estação de tratamento do petróleo, para a próxima etapa do processo que pode ser: uma estação coletora. Uma função relevante da estação coletora é o teste de vazão dos poços produtores, cujo objetivo é a verificação da produção (tanto de água e sedimentos quanto de óleo).

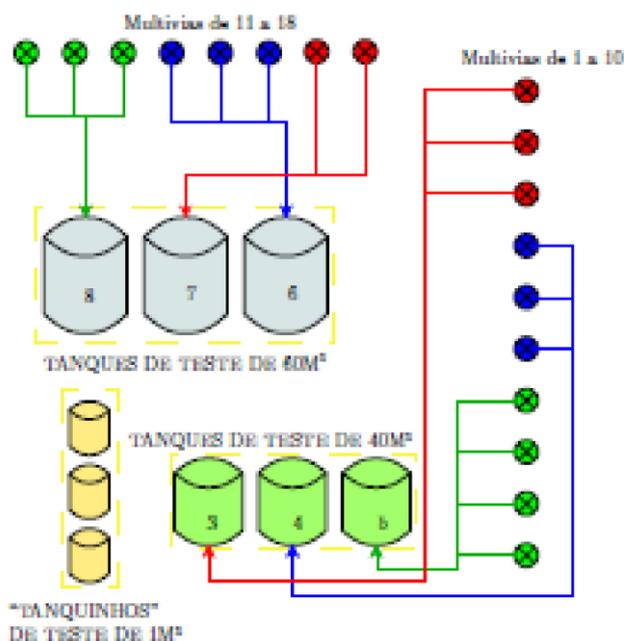
Responsável pela captação das produções de petróleo provenientes de determinado número de poços, a estação coletora é composta de tanques, linhas de produção, válvulas, multivias, bombas de transferência dentre outros. Inúmeros são os processos industriais que ocorrem em uma estação coletora e não é objetivo do presente documento descrever todos eles, mas apenas um, o teste de produção. Em uma estação coletora são conectadas as linhas de produção de vários poços de petróleo. Estas linhas chegam na estação e são conectadas em válvulas denominadas “multivias” que conduzem a produção dos poços para os tanques de produção e conseguem “isolar” a produção de um determinado poço e canalizá-la para um tanque de testes a fim de que essa possa ser mensurada.

Tanques são estruturas metálicas cilíndricas presentes numa estação coletora que podem ser classificados em dois tipos básicos dependendo da função que desempenham: Tanque de Produção e o Tanque de teste, O primeiro é normalmente é um tanque com alta capacidade de armazenamento, responsável pelo armazenamento temporário dos hidrocarbonetos produzidos por todos os poços de uma estação coletora. O segundo é utilizado para executar o teste de produção de petróleo, sua capacidade de armazenamento é notoriamente menor que o tanque de produção. Além da estação coletora, outros agentes que completam o processo de teste de produção, como o laboratório, o centro de processamento de dados e a engenharia são partes integrantes.

Um teste de produção é um procedimento operacional realizado, principalmente, na estação coletora de petróleo, com o objetivo de estimar o potencial de produção, pelos cálculos baseados nos resultados do procedimento, a produção do poço de petróleo em termos de vazão bruta, vazão bruta líquida e BSW (*Basic Sediments and Water*) que representa o percentual de água e impurezas contidas no petróleo (ANP/IMMETRO, 2013)

A figura 1 mostra a disposição dos tanques e das multivias e suas respectivas associações de forma esquemática. Com o propósito de simplificar a análise do sistema em questão, os tanques móveis não são considerados no esquema uma vez que não são utilizados exclusivamente pelos poços da estação coletora escolhida. Diversos outros poços de outras estações são testados nesses tanques móveis e portanto, sua disponibilidade não pode ser considerada numa análise exclusiva da estação em questão.

Figura 1 – esquemas de tanques e multivias da estação



Fonte: autoria própria

3. MÉTODO

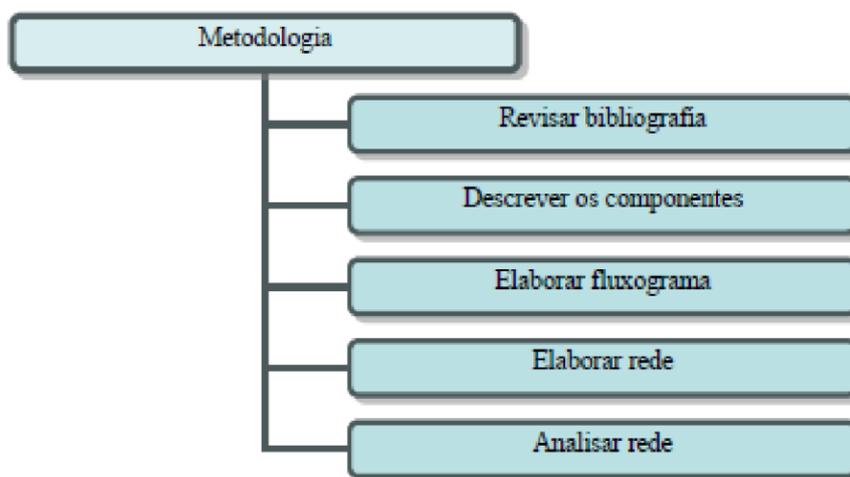
O método proposto nesta pesquisa para o modelamento está caracterizado como um estudo de caso, uma vez que ela aborda um aprofundamento técnico das características de um determinado objeto sendo recorrente à exploração dos conceitos preconizados por Gil (1999). Garbi e Grandinetti (2006) explicam que, para que se torne possível a aplicação das redes de Petri no processo de um dado sistema, faz-se necessária a descrição das etapas do processo através da construção de um fluxograma. Segundo ele o desenvolvimento da rede de Petri se dá através da associação dos eventos do fluxograma com as transições da rede. Para Cardoso e Valette (1997), interpretar uma rede de Petri implica na associação de um sentido concreto a um modelo matemático, associando os elementos desse sistema aos *lugares*, *fichas* e *transições*.

Desse modo o processo do sistema em análise será descrito, na forma de procedimentos, e representado através de um fluxograma, utilizando o modelo proposto por Slack, Chambers e Johnston (2009) e depois será convertido numa interpretação de sistemas discretos em rede de Petri.

A análise da rede utilizará um motor de inferência para executar a rede e avaliar seu comportamento. Esse motor de inferência, ou seja, o “jogador da rede de Petri” será o *software SNOOPY 2.0*, desenvolvido e distribuído pela *Brandenburg University of Technology Cottbus* da Alemanha. Segundo Blätke, Heiner e Marwan (2011) o *Snoopy* é uma ferramenta para desenhar e animar redes de Petri além de analisar o fluxo das fichas do sistema.

A metodologia da pesquisa consistirá em: estudo teórico, descrição dos componentes do sistema, descrição do processo, elaboração do fluxograma, desenvolvimento da rede de Petri, além da análise da rede e avaliação das propriedades

Figura 2 – Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: autoria própria

3.1 ELABORAÇÃO DO MODELO

A pesquisa contempla a descrição do teste de produção, que se estende do poço de petróleo, passando pela estação coletora, pelo centro de processamento de dados, pelo laboratório de análises e engenharia. A modelagem será através do conceito de eventos discretos, ou seja, não serão consideradas as diversas variações contínuas do processo, de modo que, sob a perspectiva do procedimento de teste, será elaborado o um fluxograma que fundamentará a elaboração do modelo, envolvendo os passos seguintes:

Escolha do Poço: a escolha de qual poço será testado que se dá através de alguns critérios de priorização do teste, envolvendo o tempo de bombeio desde o último teste aprovado, poço de saída de sonda, disponibilidade de tanque ou multivia, além de outros critérios subjetivos e inerentes à experiência do operador;

Verificação: escolhido o poço a ser testado, deve-se verificar se o mesmo encontra-se em funcionamento e produzindo normalmente, e com pressão normal de trabalho;

Alinhamento: realizado através do acionamento da válvula multivia, de modo a isolar e direcionar a produção do poço para o tanque de teste respectivo ao da multivia;

Despressurização: o tempo, de no mínimo uma hora, que o poço deverá ficar alinhado para o tanque de produção a fim de equalizar a pressão da linha de produção com a pressão ambiente;

Teste de vazão: após o período de uma hora de despressurização inicia-se o teste de produção, que é a espera mínima de quatro horas (varia de poço para poço) para que a produção preencha um determinado volume no tanque de produção;

Desalinhamento: ao fim do período de teste de vazão o poço é desalinhado, ou seja, a multivia volta ao estado inicial e interrompe o envio de produção para o tanque de este. Esse procedimento marca o fim do teste de vazão;

Decantação: após o teste de vazão o poço passa por um período de decantação. Esse período é

de 1 (uma) hora na maioria das vezes, e corresponde ao tempo necessário para que haja uma “separação” do petróleo da água em duas fases líquidas;

Medições e Coleta de Amostra: após o período de decantação a etapa seguinte refere-se às medições que são do volume produzido, volume da interface água-óleo e a coleta tanque é liberado e pode ser preparado para o teste seguinte;

Preparação do Tanque: coletadas as medições e amostra do teste de produção o tanque é esvaziado para receber os fluidos do próximo teste. Esse processo também é chamado de “Drenagem”;

Envio de Amostra ao Laboratório: Esse procedimento ocorre em paralelo com o envio das medições para o CPD. No laboratório a amostra será analisada e será aferido o valor de BSW, densidade e salinidade do petróleo;

Envio de Medições ao CPD: os valores de volume produzido, tempo de teste, tempo de despressurização e altura da interface água-óleo são enviados ao Centro de Processamento de Dados da companhia;

Análise do Teste: com as informações sobre as medições do teste e a amostra de petróleo devidamente cadastradas no sistema são efetuadas análises do teste histórico de produção do poço. Caso não haja mudanças em relação aos registros históricos ou mudanças nas características operacionais do poço, bem como as características físicas do reservatório, o teste é aprovado;

Reteste: Se o teste foi aprovado então o procedimento será encerrado e o poço não precisará ser testado, pelo menos pelos próximos 30 dias, ou seja, sua contagem de dias entre testes é zerada. Se o teste for reprovado, a contagem de dias sem teste se mantém e o poço deve ser testado novamente.

3.3 DESENVOLVIMENTO DA REDE

A rede de Petri elaborada nesta parte da pesquisa visa observar o sistema sob a ótica do processo, no procedimento de teste de produção, sendo destacados quatro elementos básicos: o poço de petróleo, a multivia, o tanque de teste e o teste. O teste compreende estados que envolvem o operador da estação, o laboratório, o CPD e o setor de engenharia. A nomenclatura utilizada para os lugares da rede de Petri, que representam os estados dos elementos do sistema, seguiu a seguinte regra de sintaxe:

O poço de petróleo, possui apenas quatro estados discretos que são relevantes para a modelagem, podendo estar bombeando ou parado, aguardando teste, em teste ou testado além de outros estados referentes ao teste de produção propriamente dito, nomeadamente: em despressurização, em teste de vazão e aguardando análise do teste. Além destes, outros estados foram necessários para a complementação da rede de Petri. A lista completa dos lugares dos correspondentes aos estados, e respectivas marcações iniciais para o elemento poço encontra-se na tabela 1.

De forma diferente do poço, a multivia possui apenas dois estados que serão considerados no sistema: *multivia disponível* e *multivia alinhada para teste*. Quando uma multivia está disponível, o poço pode ser alinhado para o tanque de produção e, portanto, para o teste.

Tabela 1 – Estados (lugares) para o poço de petróleo

Nome do Lugar	Nomenclatura	Marcação Inicial
Poço parado	L1P	0
Poço bombeando	L2P	1
Aguardando teste	L3P	1
Bombeio confirmado	L4P	0
Confirmação concluída	L5P	0
Em despressurização	L6P	0
Em teste de vazão	L7P	0
Teste de vazão concluído	L8P	0
Aguardando desalinhamento	L9P	0
Aguardando avaliação	L10P	0
Início do bombeio concluído	L11P	0
Poço Testado	L12P	0

Fonte: autoria própria

Após o alinhamento, a multivia fica indisponível, e nenhum outro poço pode ser alinhado até que o teste de produção termine. A tabela 2 mostra os estados do elemento multivia no sistema. No início do sistema a multivia encontra-se disponível para teste e portanto, o lugar correspondente a este estado é iniciado com uma ficha enquanto que o outro não.

Tabela 2 – Estados (lugares) para a multivia

Nome do Lugar	Nomenclatura	Marcação Inicial
Multivia disponível	L1M	1
Multivia alinhada para Teste	L2M	0

Fonte: autoria própria

Para o tanque de teste foram identificados os possíveis estados conforme mostrado na tabela 3: *tanque disponível*, *tanque ocupado* e *aguardando drenagem*. No momento em que o sistema é iniciado parte-se do pressuposto que o tanque se encontra disponível e, portanto, o lugar *L1TQ* possui uma ficha confirmando sua ativação no início da rede marcada. Os demais estados encontram-se sem ficha, confirmando que estes não estão ativados, ou seja, que o elemento “tanque de teste” não está nem aguardando a drenagem e nem indisponível.

O estado do teste é o elemento do sistema que “sofre” ação de todos os outros e, de certa forma,

caminha pelo sistema, sendo inicializado no meio do procedimento e finalizado junto com o ele é o “teste”.

Tabela 3 – Estados (lugares) para o tanque de teste

Nome do Lugar	Nomenclatura	Marcação Inicial
Tanque disponível	L1TQ	1
Tanque ocupado	L2TQ	0
Aguardando drenagem	L3TQ	0

Fonte: autoria própria

O teste de produção é *output* e os elementos de *input*, que são o poço, a disponibilidade do tanque de teste e da multivia, e dos atores que processem esses *inputs*; como o operador da estação, as equipes do laboratório e do CPD, e a engenharia. Além disso esse elemento é uma abstração do resultado de um procedimento de medição de vazão de um poço. O teste não possui nenhuma marcação inicial, conforme pode ser visto na lista de estados da tabela 4, uma vez que ele não existe até certo ponto do procedimento quando surge como resultado da evolução das etapas do processo.

Tabela 4 – Estados (lugares) para o teste

Nome do Lugar	Nomenclatura	Marcação Inicial
Teste interrompido	L1TT	0
Em decantação	L2TT	0
Aguardando coleta de amostras	L3TT	0
Aguardando medições	L4TT	0
Amostra coletada	L5TT	0
Medição realizada	L6TT	0
Medições registradas em planilha	L7TT	0
Aguardando análise do laboratório	L8TT	0
Aguardando digitação no CPD	L9TT	0
Análise das amostras aguardando digitação no sistema	L10TT	0
Medições digitadas aguardando análise	L11TT	0
Análise da amostra digitada e aguardando	L12TT	0
Teste analisado	L13TT	0
Teste aprovado	L14TT	0
Teste reprovado	L15TT	0

Fonte: autoria própria

Para identificação das relações de precedência e dependência entre os elementos, e a elaboração da evolução dos estados desses elementos ao longo do teste de produção são utilizados os conceitos e ideias da descrição do procedimento de teste, cujos eventos caracterizados pelas transições, conforme descrito no fluxograma da figura 3(anexo 1). Nesse sistema produtivo, todos os eventos são proporcionados pelos “agentes” ou atores do sistema, que são os seguintes recursos transformadores: o operador da estação coletora; a equipe do laboratório de análise; a equipe do centro processamento de dados; a engenharia e o poço de petróleo. A esses agentes transformadores do processo, serão associados grupos de transições de modo que se tenha uma relação causal, entre a mudança dos estados os elementos do sistema, e o ator responsável pela promoção dessas mudanças através de eventos.

A tabela 5 mostra a listagem de todas as transições da rede de Petri do modelo, sua respectiva nomenclatura de identificação e o “ator” (agente transformador) ao qual cada transição se refere.

Tabela 5 – Transições da rede de Petri

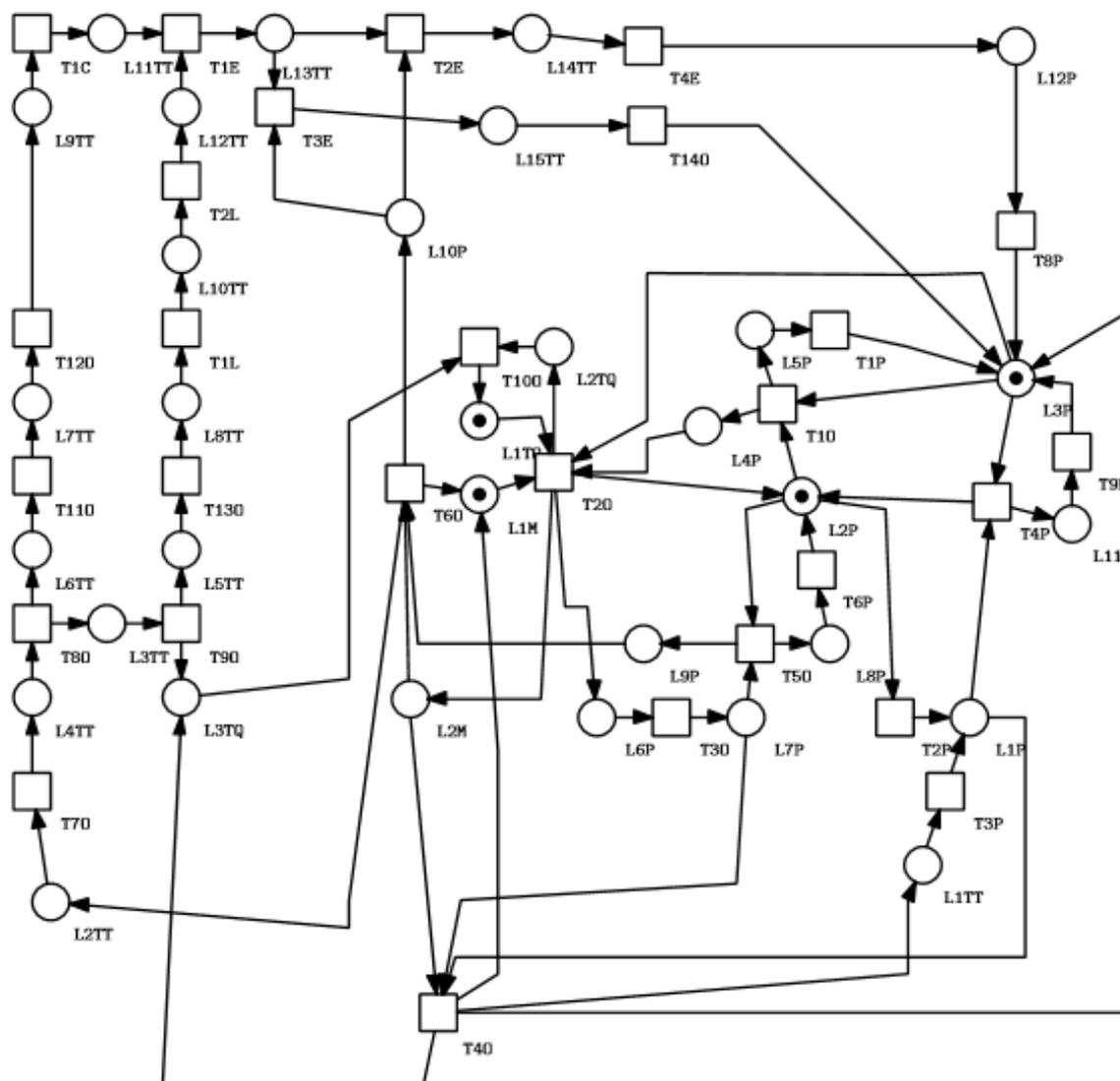
Nome do Transição	Nomenclatura	Agente transformador
Confirmar que o poço está bombeando	T1O	Operador
Poço aguarda início do teste	T1P	Poço
Alinhar poço	T2O	Operador
Encerra despressurização do Poço	T3O	Operador
Parada do poço	T2P	Poço
Interromper teste	T4O	Operador
Poço permanece parado	T3P	Poço
Início do bombeio	T4P	Poço
Finaliza teste de vazão	T5O	Operador
Poço permanece bombeando	T6P	Poço
Desalinhar poço	T6O	Operador
Finaliza da decantação	T7O	Operador
Realizar medições	T8O	Operador
Realizar coleta de amostras	T9O	Operador
Drenagem e disponibilização do tanque	T10O	Operador
Registrar medições em planilha	T11O	Operador
Envio de medições ao CPD	T12O	Operador
Envio de amostra ao laboratório	T13O	Operador
Digitar medições	T1C	CPD
Análise das amostras	T1L	Laboratório
Digitação da análise da amostra	T2L	Laboratório
Análise do teste	T1E	Engenharia
Aprovar teste	T2E	Engenharia
Reprovar teste	T3E	Engenharia

Retestar poço	T14O	Operador
Atualizar sistema oficial	T4E	Engenharia
Após 30 dias	T8P	Poço
Poço fica aguardando teste	T9P	Poço

Fonte: autoria própria

A rede final completa do processo com a integração de todas as transições e estados descritos está ilustrada da figura 4.

Figura 4 – Rede de Petri final do sistema de teste de produção



Fonte: autoria própria

4 ANÁLISE DO MODELO E RESULTADOS

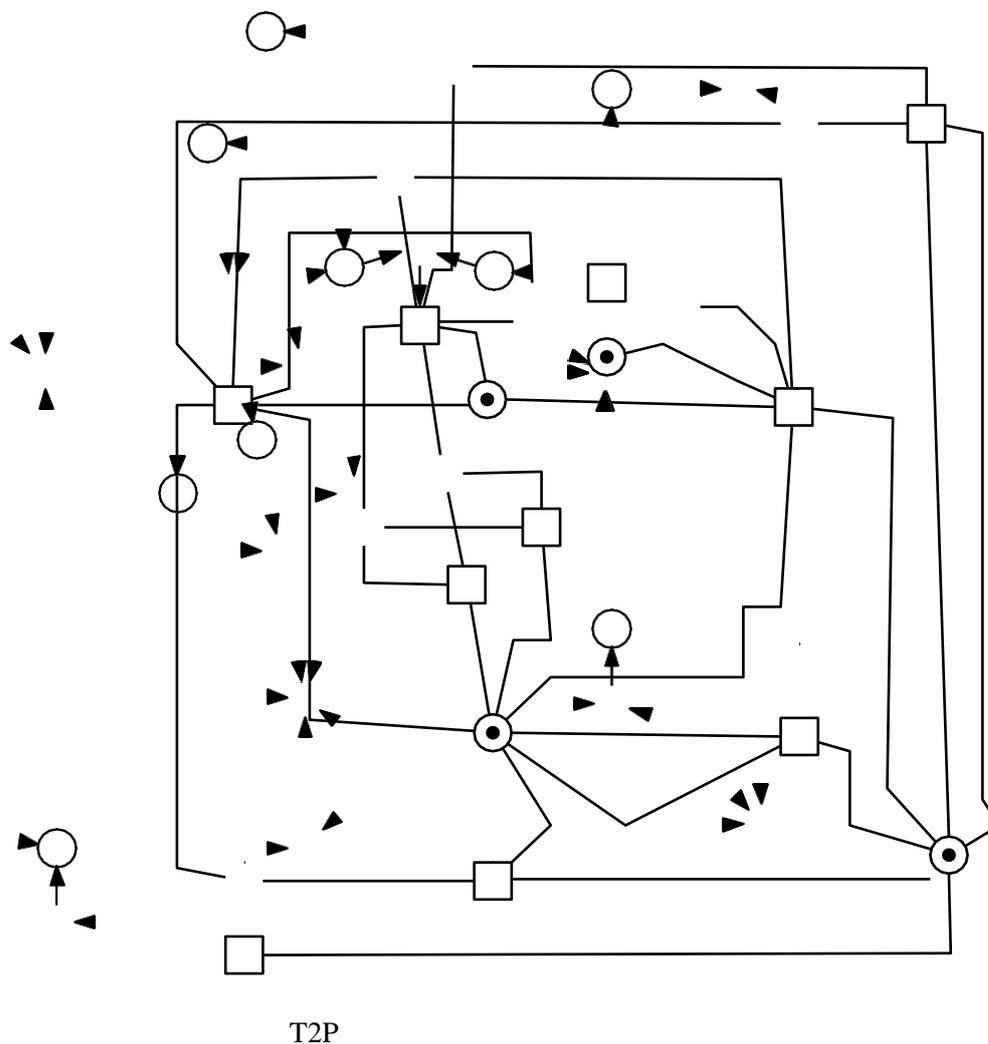
Nesta abordagem serão averiguadas as propriedades do modelo e comprovação de que este satisfaz os pré-requisitos da modelagem de sistemas a eventos discretos.

4.1 REDUÇÃO DA REDE PARA ANÁLISE

Para facilitar a análise das propriedades da rede, em função do grande número de elementos da rede de Petri e foi utilizada a técnica de redução proposta (MURATA, 1989). Considerando a obtenção de um nível aceitável de simplificação foi realizado o processo de verificação das propriedades conhecidas como as “boas propriedades” das redes de Petri, ou seja, “limitabilidade”, “reiniciabilidade” e “vivacidade”.

A figura 5 mostra o resultado da simplificação organizado segundo o layout do programa *SNOOPY 2.0*.

Figura 5 – Rede de Petri reduzida



Fonte: autoria própria

Outras reduções ainda são possíveis, mas demandariam técnicas de redução de redes que não são contempladas pelo escopo desta pesquisa. A tabela 6 (anexo 1) mostra a relação do número de transições, lugares e arcos entre a rede de Petri final e a rede simplificada (reduzida) ilustrando a vantagem de se utilizar esse método com o propósito de reduzir complexidade do sistema. As características procuradas, então a rede que a originou também as terá. Portanto o vetor das marcações será baseado na rede simplificada. Com a simplificação da rede,

permanecem treze lugares, nomeadamente: L1M, L2M, L3P, L7P, L1P, L2P, L4P, L1T Q, L2T Q, L9P, L10P, L3T Q, L13T T.

4.2 VALIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO

A fim de verificar os possíveis estados a que a rede de Petri reduzida poderia assumir, foi utilizado um método de simulação da rede pura através do “jogador da rede de Petri”, que é um simulador disponível no software SNOOPY 2.0. Para cada etapa o programa dispara arbitrariamente uma transição que esteja habilitada e exporta os valores das marcações de cada lugar para um documento de texto. Se não houver transição habilitada é exibido o alerta de “deadlock”. Inicialmente foi realizada uma simulação de 100 passos, ou seja, uma simulação onde ocorreram 100 disparos arbitrários das transições da rede.

A análise inicial dos dados mostra que, em nenhuma marcação, o número de fichas foi maior que 1 (um), produzindo um excelente indicativo de que a rede é 1-limitada, embora insuficiente, para afirmar a validade da característica. Para facilitar distinção entre os estados observados, a ser verificada, para cada marcação de cada valor individual, dos 13 lugares que compõem a rede, optou-se pela simplificação das marcações por meio da conversão dos valores binários para decimais, ou seja, assumindo que cada marcação M é um número binário de 13 dígitos é possível convertê-lo em um número decimal facilitando sua distinção

Para a primeira simulação da rede, dentro dos 100 disparos de transições, foram observados 12 estados diferentes do sistema. Esses estados foram listados na tabela 7 (anexo 1), junto de suas formas decimais e da frequência com a qual foram observados. Além disso receberam a nomenclatura M_n onde n é um número sequencial para as marcações observadas.

Foram realizadas mais 3 simulações cujos resultados possibilitaram a observação de outros 2 estados do sistema que foram nomeados respectivamente de M_{12} e M_{13} . A tabela 8 (Anexo 1) mostra a frequência da ocorrência dos estados da rede simulada pelo *software*. Tendo em vista que as simulações indicam a existência de apenas 14 estados possíveis para a rede de Petri (de M_0 a M_{13}), ou um pouco mais que isso, já que segundo Cardoso e Valette (1997) a simulação não é um método exaustivo, é plausível prosseguir com a análise de cada uma das marcações uma vez que seu número não é tão grande.

4.3 MATRIZ DE INCIDÊNCIA E ARVORE DE COBERTURA

Por meio da elaboração da árvore de cobertura foi possível verificar simultaneamente, a existência ou não de todas as “boas características” desejáveis, ou seja, vivacidade, reiniciabilidade e limitabilidade. Para propósito foi seguido procedimento proposto por Cardoso e Valette (1997) contemplando a identificação do vetor de marcações, a verificação da matriz de incidência, a análise das transições por marcação, a enumeração de todas as marcações acessíveis, a elaboração da árvore de cobertura e a verificação das propriedades.

A matriz de incidência é calculada a partir da subtração da “matriz de incidência posterior” pela “matriz de incidência anterior”. Esta última corresponde aos valores dos arcos de entrada das transições, enquanto que a primeira se refere aos arcos de saída. Desta forma a obtenção da matriz de incidência pressupõe o cálculo das outras matrizes da rede.

$$C = Post - Pre$$

Onde:

- C é a matriz de incidência;
- Pre é a matriz de incidência anterior, ou seja, é a matriz dos arcos de entrada;
- $Post$ é a matriz de incidência posterior, ou seja, é a matriz dos arcos de saída.

Todas as matrizes são do tipo $n \times m$, onde n é o número de lugares da rede e m é o número de transições. O primeiro passo para elaboração das matrizes, tanto de incidência

anterior, quanto de incidência posterior, é a identificação dos lugares de entrada e dos lugares de saída das transições. A tabela 9 (anexo 1) mostra a relação de todas as transições da rede de Petri reduzida e os lugares de entrada e saída associados. Para a matriz de incidência anterior são utilizados os lugares de entrada e, como todos os arcos da rede são unários, então o valor 1 para cada lugar de entrada das transições é utilizado na matriz. Por outro lado, para a matriz de incidência posterior, são utilizadas as relações dos lugares de saída das transições. Como a rede reduzida apresenta 13 lugares e 10 transições então as matrizes serão do tipo 13×10 . De forma resumida a matriz de incidência será:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} L1M \\ L2M \\ L3P \\ L7P \\ L1P \\ L2P \\ L4P \\ L1TQ \\ L2TQ \\ L9P \\ L10P \\ L3TQ \\ L13TT \end{matrix}$$

4.3. ANÁLISE DAS PRINCIPAIS MARCAÇÕES ACESSÍVEIS

Na matriz de incidência C cada uma das colunas representa o vetor de incidência de uma transição dada pela notação $C(., t)$. O vetor de incidência da segunda transição ($T2P$) é dado por: $C(., T2P)$. Para calcular o efeito da transição $T2P$ sobre o vetor de marcações inicial ($M0$) calcula-se: $M0 + C(., T2P)$. O vetor obtido é um novo vetor de marcações que determina o estado do sistema da rede de Petri resumida. É importante lembrar que só se pode aplicar o vetor de incidência da transição se esta estiver habilitada, ou seja, se para cada valor da matriz de incidência anterior $Pre(., t)$ da transição t existir um valor igual ou superior de fichas no lugar equivalente do vetor de marcações M .

A tabela 10 (anexo1) mostra a lista das marcações acessíveis e as respectivas transições habilitadas para cada marcação. Nesta tabela, na coluna de “marcações acessíveis”, os nomes das marcações atingíveis pela marcação atual estão dispostos em ordem alfa-numérica crescente. Na coluna adjacente, “transições habilitadas”, encontram-se as transições necessárias para se atingir a marcação. As transições independentes, ou seja, aquelas cujos lugares de entrada são diferentes umas das outras, podem disparar simultaneamente e portanto, geram uma nova possibilidade de disparos. Esse tipo de disparo corresponde a soma dos dois vetores de incidência das transições independentes.

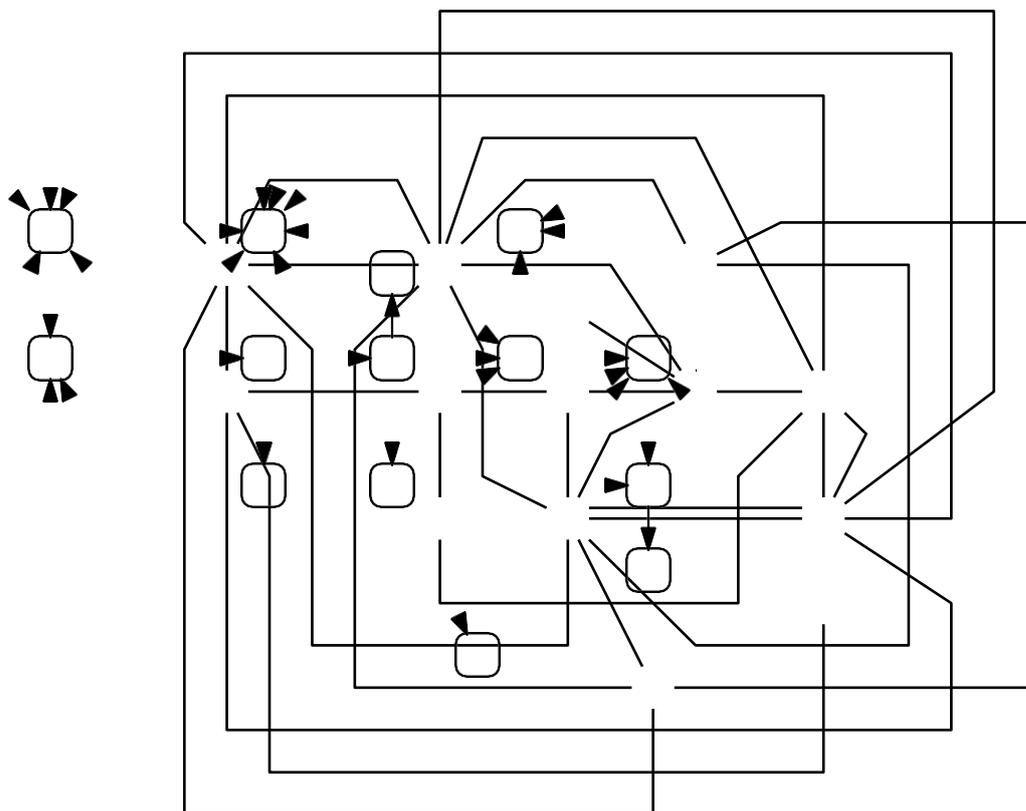
Na rede existem duas transições concorrentes e antagônicas que são $TR3$ e $TR4$. Elas compartilham dos mesmos lugares de entrada e de saída e, dessa forma aplicam o mesmo efeito sobre a rede de Petri, entretanto essas transições não podem ser disparadas simultaneamente. As transições estão notadas na tabela 10 na forma ($TR3$ ou $TR4$) indicando sua concorrência e equivalência.

A montagem árvore de marcações acessíveis pode ser formulada com base nas informações dispostas na tabela 10. Para cada uma das marcações conhecidas indica-se quais as marcações atingíveis a partir desta, pelo disparo das transições habilitadas. As marcações destacadas em “cinza” representam estados previamente atingidos por marcações anteriores. A partir do observado na figura 6 (anexo 1), com a esquematização da árvore de alcançabilidade e dos vetores transpostos na tabela 10 é possível afirmar que o número de marcações acessíveis pela rede é finito e que o número de ficha nos lugares nunca é maior que um. Dessa forma tem-se que a rede de Petri é 1-limita, ou seja, possui a propriedade da limitabilidade com $k = 1$ o que a torna uma rede “segura”.

A figura 7 mostra a conectividade que existe entre as marcações da árvore, que evidencia o fato de que, outras duas das “boas propriedades” das redes marcadas podem ser

observadas na rede.

Figura 7 – Árvore de cobertura com conexão das marcações



Fonte: autoria própria

A primeira propriedade é a reiniciabilidade, uma vez que, para qualquer marcação M existe um conjunto de disparos de transição capaz de levar o sistema ao estado M_0 . E a segunda propriedade é a vivacidade, ou seja, para qualquer marcação acessível existe pelo menos uma transição habilitada permitindo a evolução do sistema. Desta forma, a rede exposta na figura 4 é capaz, tanto de representar descritivamente o processo, quanto de ser utilizada de forma eficaz em um modelo de simulação de processo.

5. CONCLUSÕES

A rede de Petri elaborada demonstrou possuir as características desejáveis para um sistema a eventos discretos: *limitabilidade*, *vivacidade* e *reiniciabilidade*. A limitabilidade em $k = 1$ (rede segura) foi demonstrada por meio da constatação de que, em nenhuma das marcações acessíveis foi encontrado lugar cuja quantidade de fichas fosse superior a 1 (uma). Por sua vez, a vivacidade pôde ser observada já que, em todas das marcações acessíveis foi verificada a existência de pelo menos uma transição sensibilizada, conforme observado na tabela 10. Por fim, a reiniciabilidade foi constatada tanto pelo grafo da árvore de marcações acessíveis, quanto pelo grafo conexo (figura 6), onde pôde-se observar que, a partir de qualquer marcação, é

possível atingir a marcação inicial $M0$ por um número finito de disparos de transição.

Essa avaliação de propriedades foi possível graças a redução simplificada da rede de Petri. A redução, além de ter possibilitado uma expressiva diminuição de mais de 50% da rede de Petri, conforme observado na tabela 7 (anexo 1), garantiu, por suas propriedades matemáticas, que as características observáveis na rede original se mantivessem na rede reduzida. A redução, como uma das etapas da análise, foi necessária uma vez que, a partir da avaliação dos estados possíveis para cada um dos elementos observados no processo, a quantidade de transições do sistema e as respectivas relações de fluxos ficaram demasiadamente grandes. Dessa forma, com a combinação de todos os lugares (que representam os estados dos sistemas) e de todas as transições (que representam as modificações dos estados), a rede de Petri atingiu um elevado nível de complexidade, conforme previsto para grandes sistemas.

A modelagem da rede de Petri, foi satisfatória pela completa descrição de todas as etapas do processo e dos elementos envolvidos. Tais etapas foram esquematizadas na forma de um fluxograma (figura 3) que apresenta a ordenação destas, os possíveis eventos capazes de modificá-las, e os elementos que as compõem. Cada um dos elementos do processo foi listado, avaliado, identificado e contextualizado, na forma de componente das etapas do teste de produção de poços de petróleo. Esse passo da metodologia foi a base para fundamentar todo o estudo de caso da pesquisa.

Este trabalho apresentou um modelo a eventos discretos de testes de produção em redes de Petri que, além de ser capaz de descrever detalhadamente as etapas e características do processo, servirá de base para futura implementação de um algoritmo para estudo de simulação e para elaboração de projetos de automação. A partir disso, é reforçada a vantagem da utilização das redes de Petri para a elaboração de modelos desta natureza. O modelo é conexo, coerente, fidedigno às características do processo, consistente, válido e possuidor das propriedades desejadas.

A partir do modelo elaborado na pesquisa, várias as possibilidades para continuação e melhorias da avaliação do processo descrito. A partir da coleta de dados de tempo e frequência dos eventos, será possível atribuir características probabilísticas à rede de Petri na forma de eventos estocásticos. Essa caracterização transformará a rede numas de suas evoluções, a rede de Petri estocástica. O modelo serve de roteiro para elaboração de um sistema simulado. A partir dele serão desenvolvidos os projetos de simulação para compreensão do sistema sob a ótica dos eventos e das suas possibilidades probabilísticas de ocorrência. Dessa forma, alterações no método de teste, na quantidade de recursos disponíveis, e nas relações entre as etapas, poderão ser realizadas, estimadas e avaliadas computacionalmente sem que seja necessária sua implementação no sistema real. A rede, como modelo a eventos discretos, também será útil para o desenvolvimento de projetos de automação do teste de produção. A partir dela poderão ser desenvolvidas lógicas de automação industrial com sensores, atuadores e controladores lógicos computacionais, potencializando uma relevante diminuição das variações no processo, que pode ensejar o aumento da sua eficiência.

REFERÊNCIAS

ANP. Artigo da Agência Nacional de Petróleo, *Royalties do petróleo e do gás natural*. 2009. Cartilha publicada em meio eletrônico. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?dw=18820>>. Acesso em: 21 jun. 2014. Citado na página 44.

ANP/IMMETRO, *Cálculo dos Royalties*. 2013. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 14 Dez. 2013.. *RESOLUÇÃO CONJUNTA ANP/INMETRO No 1* : Regulamento técnico de medição de petróleo e gás natural a que se refere à resolução conjunta anp/inmetro no 1, de 10 de junho de 2013. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/>>. Acesso em: 25 jan. 2014.

BLÄTKE, M.; HEINER, M.; MARWAN, W. *Tutorial - Petri Nets in Systems Biology*. [S.l.], 2011.

CARDOSO, J.; VALETTE, R. *Redes de Petri*. Florianópolis: UFSC, 1997. Disponível em: <<http://dainf.ct.utfpr.edu.br/~maziero/lib/exe/fetch.php/software:redes-de-petri-cardoso-valette.pdf>>. Acesso em: 4 Fev. 2014.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos*. 3. ed. São Paulo: Bravarte, 2010. ISBN 978-85-905978-3-4. CORRÊA, O. L. S. *Petróleo*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. ISBN 85-7193-093-7.

CORRÊA, O. L. S. *Petróleo*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. ISBN 85-7193-093-7.

GARBI, G. P.; GRANDINETTI, F. J. Aplicação de redes de petri em um sistema de identificação e transporte de três tipos diferentes de produtos. *Revista Ciências Exatas*, v. 12, n. 1, p. 47–51, 2006. Citado na página 47.

GIL, A. C. *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999. ISBN 85-224-2270-2. Citado na página 47.

HOLANDA, R. A. de S. *Modelagem do Comportamento Dinâmico de uma Célula de Manufatura Didática Utilizando Redes de Petri*. Monografia (Graduação) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2012.

LINO, F. G. O.; SZTAJNBERG, A. Analisador e simulador de redes de petri. In: *Anais do XXVII congresso da SBC*. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 2007. p. 898 – 903.

SALES, A. H. C. de. *Um Estudo sobre Redes de Petri Estocásticas Generalizadas*. 2002. Trabalho Acadêmico. Disponível em: http://www.inf.pucrs.br/peg/pub/tr/TI1_Afonso.pdf. Acesso em: 29 jan. 2014.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. *Administração da Produção*. 3. ed. [S.l.]: Atlas, 2009. ISBN 97-885-224-5353-5

ANEXO I – Fluxograma de Teste de Produção e Tabelas do Estudo de Caso

Figura 3- Fluxograma de Teste de produção

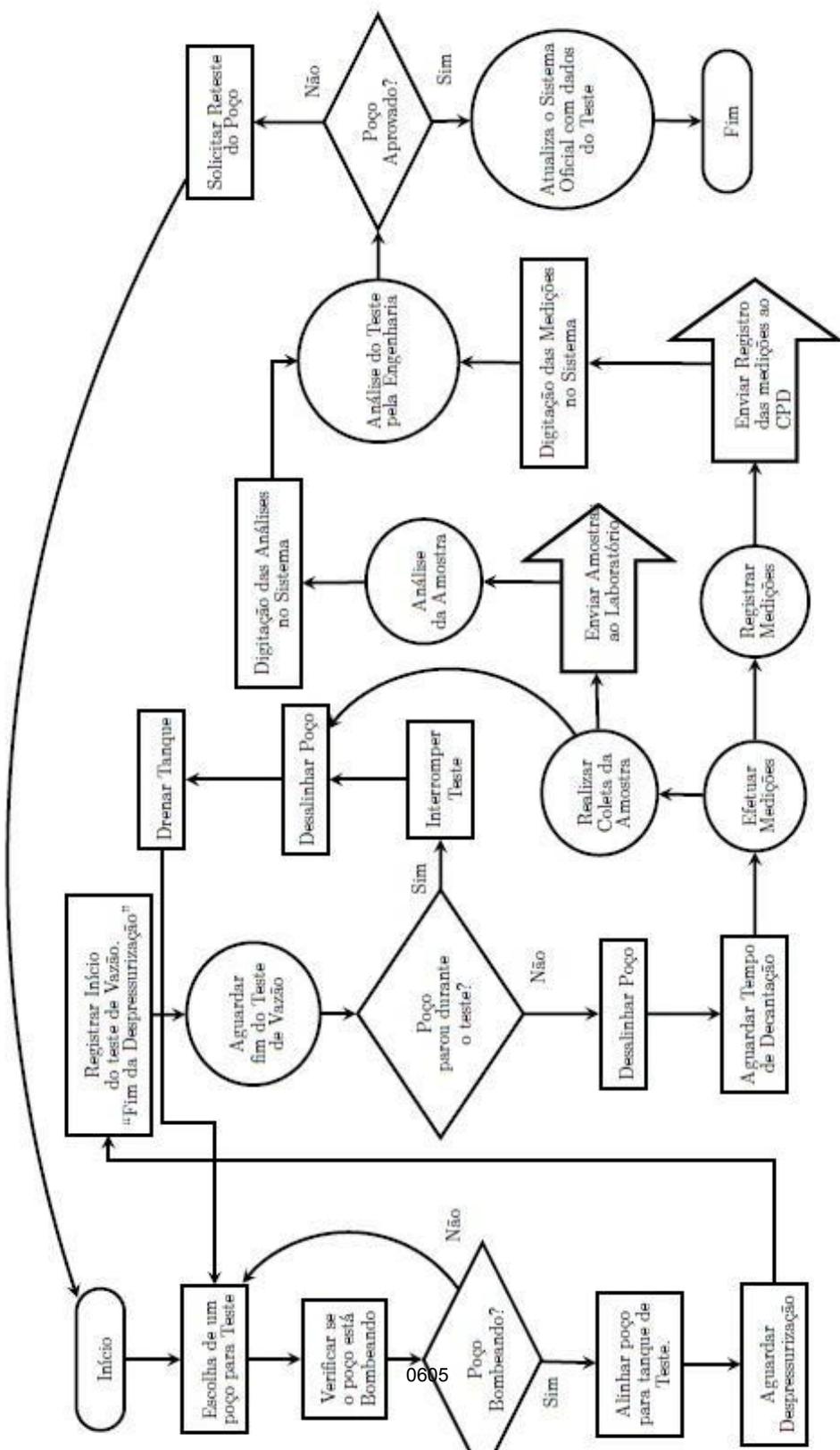
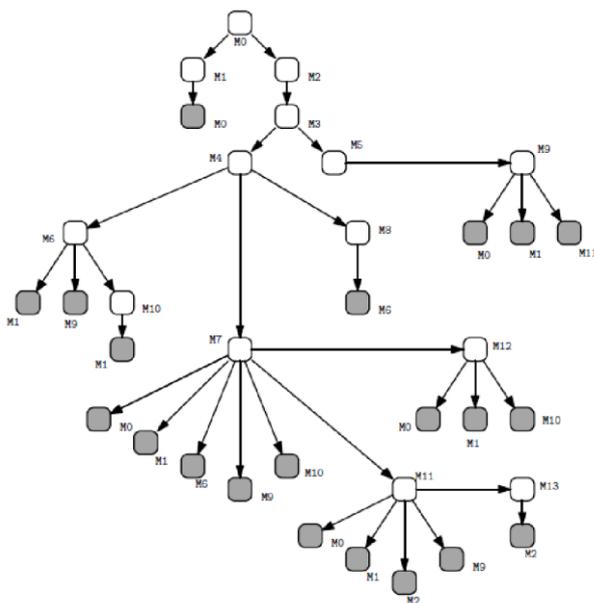


Figura 6- Árvore de cobertura para rede simplificada



Fonte: autoria própria

Tabela 6 – Comparação entre as redes de Petri

Característica	Rede de Petri Final	Rede de Petri Reduzida	Redução (%)
Transições	28	10	64,28%
Lugares	32	13	59,37%
Arcos	82	44	46,34%

Fonte: autoria própria

Tabela 7 – Estados observados na primeira simulação

Marcações da Rede	Forma decimal	Nomenclatura	Frequência
1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0	5280	M0	20
1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0	5408	M1	14
1 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0	5216	M2	15
0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0	2704	M3	15
0 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 0	2200	M4	4
0 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0	2832	M5	10
1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1	4375	M6	2
1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 1 1	4247	M7	2

L1TQ		
TR7	L1P, L3P	L2P, L3P
TR8	L3P, L2P	L3P, L4P
TR9	L2P, L7P	L2P, L9P

Fonte: autoria própria

Tabela 10 – Transições habilitadas e marcações acessíveis

Marcação	Formato transposto	Transições Habilitadas	Marcações Acessíveis
M0	1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0	T2P TR8	M1 M2
M1	1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0	TR7	M0
M2	1 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0	TR6	M3
M3	0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0	TR9 T2P	M4 M5
M4	0 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 0	(T2P + TR10) TR10 T2P	M6 M7 M8
M5	0 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0	TR5	M9
M6	1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1	(T10O + (TR3 ou TR4)) (TR3 ou TR4) T10O	M1 M9 M10
M7	1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 1 1	(T10O + (TR3 ou TR4)) (T2P + T10O + (TR3 ou TR4)) T2P (T2P + (TR3 ou TR4)) (T2P + T10O) (TR3 ou TR4) T10O	M0 M1 M6 M9 M10 M11 M12
M8	0 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0	TR10	M6
M9	1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0	(T10O + TR7) T10O TR7	M0 M1 M11
M10	1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1	(TR3 ou TR4)	M1
M11	1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0	T10O (T10O + T2P) (T10O + TR8) T2P TR8	M0 M1 M2 M9 M13
M12	1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1	(TR3 ou TR4) (T2P + (TR3 ou TR4)) T2P	M0 M1 M10
M13	1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0	T10O	M2

		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
5 2 8 0	M 0	20	25	22	20
5 4 0 8	M 1	14	18	14	14
5 2 1 6	M 2	15	13	14	14
2 7 0 4	M 3	15	12	14	14

2 2 0 0	M 4	4	8	7	6
2 8 3 2	M 5	10	4	6	8
4 3 7 5	M 6	2	8	6	4
4 2 4 7	M 7	2	0	1	2
2 3 2 8	M 8	2	3	3	2
5 3 9 4	M 9	11	7	9	10
4 3 8 9	M 1 0	2	2	1	2
5 2 6 6	M 1 1	3	0	2	3
4 2 6 1	M 1 2	0	0	1	0
5 2 0 2	M 1 3	0	0	0	1

Fonte: autoria própria