



## **MODELAGEM DE SISTEMA DE PARTIDA E PARADA DE UMA TURBINA HIDRELÉTRICA USANDO REDES PETRI**

Silva, C.O.<sup>1,2</sup>, Carvalho, R.V.<sup>1,2</sup>, Galvão Filho, A.R.<sup>1,2</sup>, Coelho, C.J.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Computação Científica - Escola de Ciências Exatas e da Computação  
Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Goiânia-Goiás-Brasil

<sup>2</sup> Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas  
Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Goiânia-Goiás-Brasil

**RESUMO:** Um dos sistemas primordiais para a produção de energia em uma usina hidrelétrica consiste em controlar as unidades geradoras elétricas. O sistema de partida e parada dos geradores é o cerne principal nesse quesito, o qual necessita checar inúmeras pré-condições para seu correto funcionamento. Neste artigo é proposto um modelo qualitativo usando redes Petri para o sequenciamento do módulo de partida e parada de uma turbina hidrelétrica. O modelo proposto descreve a operação do sistema passo a passo e suas relações lógicas com cada estágio do processo de partida e parada. O modelo (e possíveis extensões quantitativas) podem se tornar uma ferramenta importante para analisar o sistema de controle de uma usina hidrelétrica, auxiliando na tomada de decisão de seus operadores.

**Palavras-chave:** Redes de Petri, Partida e Parada, Turbina Hidrelétrica.

**ABSTRACT:** The governor system, which controls the electricity generation units, is one of the most important systems in hydroelectric power plant. The procedure of starting and stopping a turbine is at the center of the governor system, which demands a prerequisites verification process for the turbine correctly function. This work proposes a qualitative method using Petri nets to model the sequencing steps of the starting stopping module of a hydroelectric turbine. The proposed model describes the logic relationship between the sequencing steps and the start/stop turbine stages. The qualitative model (and future quantitative extensions) can become an important tool to analyse the control of governor system in a hydroelectric power plant. Therefore helping in controlling the system and on the decision making process of its operators.



**Keywords:** Petri net, Starting and Stopping Process, Hydroelectric turbine.

## **1. Introdução**

Uma usina hidrelétrica utiliza turbinas e geradores para produzir eletricidade. Elas usam da força do fluxo da água para produzir eletricidade, sendo composta por três partes principais: o reservatório, que armazena a água; o regulador de velocidade, que controla o fluxo da água de entrada; e a unidade geradora, onde a energia é gerada. Dessa forma, uma barragem abre a comporta para que a água do reservatório flua até as turbinas. A água em movimento gira as pás das turbinas que são acopladas a um gerador para produzir energia elétrica [19]. O eixo da turbina transmite a energia mecânica para os geradores que transformam a energia em eletricidade. A energia produzida tem rendimento de acordo com as condições operativas da instalação [25]. O módulo de partida e parada de uma turbina requer um sequenciamento de procedimentos considerando os fatores de segurança e vida útil da unidade geradora.

Como fonte geradora da energia em uma usina hidrelétrica, é essencial analisar, controlar e operar de forma ótima as turbinas para o sucesso na produção energética. Entretanto, encontrar esse ponto ótimo de funcionamento não é uma tarefa segura de ser realizada por meio de tentativa e erro. É necessário estudos, modelos e simulação para garantir o melhor funcionamento sem que haja danos e riscos para o funcionamento da usina e para a segurança de seus operadores. Nesse sentido, desenvolver modelos representativos, seja através de maquetes físicas, modelos matemáticos ou computacionais ajudam na parametrização, análise e controle da geração de energia proveniente das turbinas.

A rede Petri (Petri Nets, PN) é uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática que permite a representar sistemas utilizando robusta base matemática. A PN permite modelar sistemas paralelos, concorrentes, assíncronos e não-determinísticos [8]. Sistemas elétricos são objetos típicos de investigação minuciosa e diagnósticos a partir de modelos utilizando redes Petri [23]. Mansour, explorou as características de processamento de informação paralela e a capacidade de operação concorrente (simultânea) de uma PN para a construção de um modelo



de diagnóstico de falhas de uma turbina por meio de informações provenientes de um sistema de supervisão e aquisição de dados (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) [16]. Tavana publicou artigo sobre a modelagem de um sistema de gerenciamento de emergência na usina nuclear de Khaskovo na Europa Oriental [24]. Pósna et al publicaram o modelo da dinâmica e do estado estacionário de uma rede elétrica empregando a PN colorida [22].

O módulo de partida e parada de uma turbina requer um sequenciamento de procedimentos considerando os fatores de segurança e vida útil da unidade geradora. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é introduzir a PN na modelagem qualitativa de partida e parada de uma turbina hidrelétrica para oferecer suporte conceitual e matemático para futuros modelos. Para este estudo foram coletados dados do sistema de partida-parada de uma turbina da Usina Hidrelétrica Jirau, localizada no Rio Madeira em Rondônia.

## **2. Materiais e Métodos**

O objeto de estudo deste trabalho é o módulo de partida e parada da turbina de uma unidade geradora da usina hidrelétrica de Jirau (UHE Jirau). Localizada na Região Norte do Brasil em Porto Velho - RO. no Rio Madeira, a UHE Jirau possui 2 casas de força. A casa de força aloja os equipamentos eletromecânicos responsáveis pela geração de energia em uma usina hidrelétrica, entre eles, a turbina, o gerador de velocidade e o sistema excitação [20].

A casa de força 1, localizada na margem direita do Rio Madeira, possui um total de 28 geradores e sete transformadores elevadores, enquanto a casa de força 2, localizada na margem esquerda do Rio Madeira tem 22 geradores e 6 transformadores elevadores, totalizando 50 unidades geradoras equipadas com turbinas tipo bulbo de dois fabricantes distintos. Somadas, as duas casas de força têm 50 unidades geradoras, sendo que, com a máxima eficiência operacional, cada unidade geradora terá capacidade instalada de 76,5 MW. O vertedouro é composto por 18 comportas do tipo segmento e está localizado entre as duas casas de força. A capacidade instalada da UHE Jirau é de 3750 MW e a garantia física é de 2216,6 MW.



Cada unidade geradora da UHE Jirau é controlada por uma unidade de aquisição e controle por meio do software SCADA que é o sistema supervisor da usina responsável por monitorar e supervisionar as variáveis e os dispositivos de sistemas de controle tais como:

- Preparação para partida do grupo gerador;
- Partida e parada automática da unidade geradora;
- Sincronizador automático, envio de pulsos aos reguladores;
- Execução das paradas de emergência;
- Aquisição de temperaturas;
- Controle de potência ativa;
- Controle de tensão do gerador;
- Acionamento e supervisão de subsistemas.

Esse sistema permite monitorar e operar os processos e equipamentos envolvidos na geração de energia. Flexibilizando as operações em relação à unidade geradora e as operações de partida e parada. Além disso, o sistema permite a verificação de falhas e auxilia na tomada de decisão dos operadores.

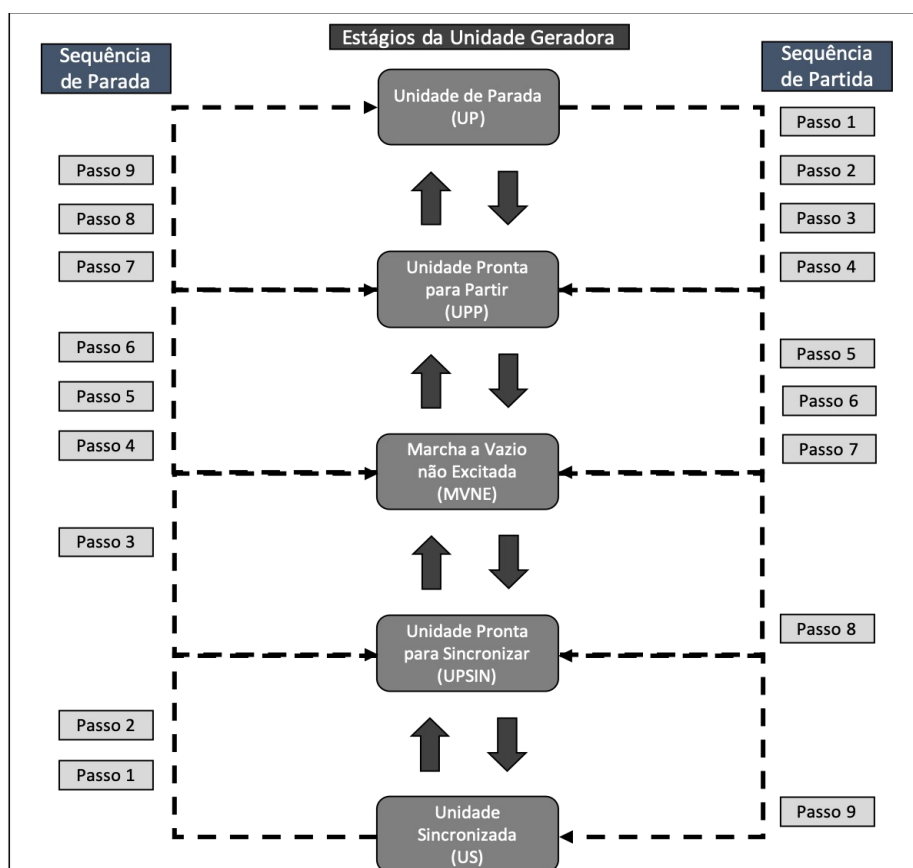
## **2.1. Sistema de partida e parada**

O sistema de partida e parada de uma unidade geradora fornece a seleção do modo de operação e um meio de iniciar e parar uma unidade geradora. O sistema de partida e parada pode ter graus e competências variadas para a intervenção do operador, sendo no modo automático ou totalmente manual. Independentemente do tipo de operação selecionada o sistema deve obedecer a um sequenciamento lógico e dependem da complexidade e características de cada operação que são determinadas por pré-condições [15]. A figura 1 ilustra os passos de partida e parada da turbina de uma unidade geradora da Usina Hidrelétrica Jirau e os estágios/processos relacionados a operação da unidade e na geração de energia.



Cada passo da operação é realizado conforme o cumprimento de pré-condições estabelecidas pelo sistema de partida-parada definidos em cada processo. Para iniciar-se o processo de partida, é necessário que a unidade geradora esteja completamente parada, ou seja, esteja no estágio de UP (Unidade Parada). Isso significa que os pré-requisitos relacionados aos componentes da turbina, tais como bombas, regulador de velocidades, válvulas, freios, entre outros estejam desligados, fechados ou desaplicados.

Para iniciar-se a partida da unidade geradora, quatro passos, relacionados aos pré-requisitos dos componentes da turbina, são executados sequencialmente, passando o sistema do estágio UP para o estágio pronto para partir (UPP). Nesse caso, as pré-condições dos passos 1 (i.e.: pelo menos 7 ventiladores ligados, resistência de aquecimento do gerador desligada, bomba nº 1 de circulação dos mancais ligada, etc.), as pré-condições do passo 2 (i.e.: válvula motorizada do sistema de resfriamento de água de resfriamento aberta, válvula geral do sistema de óleo de lubrificação aberta, etc.), as pré-condições do passo 3 (i.e.: bomba nº 1 do regulador de velocidade ligada) e as pré-condições do passo 4 (i.e.: válvula de isolamento do sistema de regulação aberta), foram atendidas.





**Figura 1 :** Desenho esquemático do processo de partida e parada de uma unidade geradora segundo o sistema de controle da Usina Hidrelétrica de Jirau

Até este momento (estágio UPP) a turbina ainda encontra-se parada, porém com o sequenciamento de partida acionado. Com o sequenciamento ativando os pré-requisitos do passo 5 (i.e.: válvula de emergência do distribuidor energizada), do passo 6 (i.e.: freio desaplicado), do passo 7 (i.e.: regulador de velocidade ligado, bomba nº 1 de alta pressão desligada, etc.), a turbina começa entrar em movimento e o sistema passa do estágio UPP para o estágio de movimento sem excitação, ou Marcha Vazio Não Excitada (MVNE). Nesse estágio, a turbina começa rotacionar porém sem uma tensão no gerador.

Uma vez a turbina em rotação, o passo seguinte é sincronizar o gerador com a rede elétrica para que permita que a unidade geradora forneça energia para o sistema. Nesse caso, o passo 8 é ativado, o qual são verificados se seus pré-requisitos (i.e.: disjuntor de campo fechado) foram atendidos. Após esse passo, o sistema entra no estágio pronto para sincronizar (UPSIN). Em seguida, é ativado o passo 9, onde seus pré-requisitos também são verificados (i.e.: disjuntor do gerador fechado) indicando que a unidade geradora está sincronizada (estágio US), permitindo desta forma, que a unidade geradora forneça energia para o sistema.

Para o iniciar-se o processo de parada normal da turbina, ou seja, quando não existe nenhum mecanismo de emergência acionado, o sequenciamento do sistema é inverso ao da partida. O processo de parada pode ser iniciado em qualquer uma das fases do sistema de partida e parada, no entanto, quando a unidade está sincronizada o processo de parada inicia-se pela unidade em US passando para o estágio UPSIN quando o passo 1 (i.e.: descarregar potência ativa/reactiva) e o passo 2 (i.e.: abrir disjuntor do gerador) são atendidos. Após esse procedimento, o sistema verifica as pré-condições para a parada atribuídas ao passo 3 (i.e.: desligar excitação), passando assim para o estágio MVNE. Após essa etapa, o passo 4 (i.e.: desligar regulador de velocidade), passo 5 (i.e.: desenergizar válvula de emergência) e passo 6 (i.e.: aplicar freios) são executados, passando o sistema para o estágio UPP. Em seguida, o passo 7 (i.e.: desligar bombas e fechar válvulas do regulador de velocidade), o passo 8 (i.e.: desligar bomba de alta pressão) e 9 (i.e.: desligar auxiliares mecânicos do gerador e habilitar aquecimento) deverão ser finalizados e com isso retornando a unidade geradora ao estágio UP.



Tanto na sequência de partida, quanto na de parada, o operador poderá enviar o comando aos dispositivos/subsistemas em qualquer um dos estágios (UP, UPP, MVNE, UPSIN, US), porém sempre respeitando os passos antecessores ao processo. Toda a sequência operativa é feita através de computador, que pela aquisição de dados, enviados por meio de relés e dispositivos, que mantêm o sistema de gerenciamento (i.e.: sistema SCADA) informado das condições operativas de cada equipamento nos diversos estágios da unidade geradora. Através do sistema, a ativação dos passos pelo sistema é repassada para os relés e dispositivos, os quais providenciam a sequência automática da partida-parada da máquina.

## 2.2. O formalismo de redes Petri

A rede Petri é um formalismo de modelagem baseada em grafo utilizada para modelagem matemática de sistemas complexos. Este formalismo, de forte apelo gráfico, utiliza uma sólida base matemática e é bastante adequado nos casos de estudos de sistemas complexos com características de elementos concorrentes, conflitantes, paralelos, assíncronos, distribuídos e estocásticos [21, 3]. Tal formalismo vem sendo amplamente utilizada, nas mais variadas instâncias de atuação, entre os quais destacam-se os sistemas biológicos, de manufatura, de logística, de comunicação, de informação e de forma geral para modelagens e simulações que necessitem de fundamentação matemática [1].

Uma rede Petri é definida por um por um grafo bipartido que opera com conceito de nós. A estes nós, dá-se o nome de estados (lugar ou posição) e transições. Estes mesmos nós são conectados através dos arcos e a existência de recursos dentro desta rede é indicada pela presença de marcas (ou fichas). Por convenção, os estados são representados por círculos, as transições por barras (quadrados ou retângulos) e os arcos por setas unidirecionais [26]. A figura 2 apresenta um exemplo básico de uma rede de Petri e seus elementos.

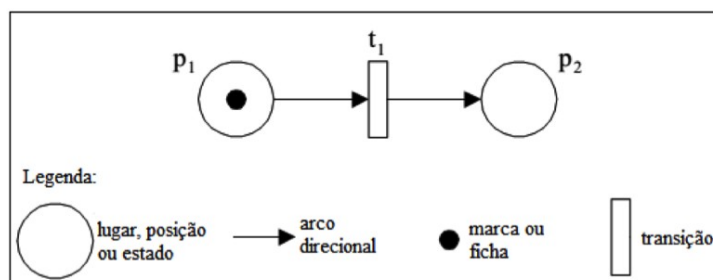


Figura 2 : Elementos de uma rede de Petri



Em uma animação do comportamento dinâmico de sistemas, a marcação da PN é modificada a cada ação realizada, onde uma transição consome uma marca de um estado e produz uma marca no estado subsequente [13].

As redes de Petri podem servir como um formalismo guarda-chuva através de uma gama de variações e extensões do formalismo. Essas variações proporcionam a modelagem qualitativa, quantitativa, estocástica, contínua ou híbrida, de acordo com a demanda do problema. As redes Petri Qualitativas (QPN – Qualitative Petri Nets) compreendem uma classe de redes que descrevem o padrão das redes Estados/Transição (P/T nets), tendo como adicional a função de peso [14]. Formalmente, é dada por uma 5- tupla  $PN = (E, T, A, P, M_0)$ , onde sua definição formal, adaptada de [18], é dada por:

- $E, T$  são conjuntos finitos e não vazios.
- $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  é um conjunto finito de **estados** de dimensão  $n > 0$ .
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  é um conjunto finito de **transições** de dimensão  $m > 0$ .
- $A \subseteq ((E \times T) \cup (T \times E))$  é  $\mathbb{N}$  define o conjunto de arcos direcionados, com valores inteiros não-negativos (fluxo de relação).
- $P: A \rightarrow \{1, 2, 3, 4, \dots\}$  é a função peso.
- $m_0: E \rightarrow \{1, 2, 3, 4, \dots\}$  denota a marca inicial.
- $E \cap T = \emptyset$ ,
- $E \cup T \neq \emptyset$ .

Além destas, os pré-conjuntos e pós-conjuntos do nó  $x \in E \cup T$ , são definidos conforme [21] por:

- Pré-conjunto:  $\cdot x := \{y \in E \cup T \mid f(y, x) \neq 0\}$
- Pós-conjunto:  $x \cdot := \{y \in E \cup T \mid f(y, x) \neq 0\}$

Para os estados e transições, temos quatro conjuntos definidos por:





1.  $\cdot t$  - pré-estados da transição  $t$ .
2.  $t \cdot$  - pós-estados da transição  $t$ .
3.  $\cdot e$  - pré-estados da transição  $e$ .
4.  $e \cdot$  - pós-estados da transição  $e$ .

Existem diversas ferramentas gratuitas para a modelagem e simulação de redes Petri amplamente abordada na literatura, como Design/CPN, ExSpect, Petri Net Analyser, Petri Net Tools, CPN Tools, Snoopy, dentre outras [2, 5, 6, 7, 17, 25]. O software Snoopy [9] é uma ferramenta utilizada para realizar modelagem, animação e simulação hierárquica de sistemas em redes Petri sendo baseado em um formalismo gráfico. Por ser uma ferramenta completa (pois aborda todo o formalismo PN e suas extensões), multiplataforma e gratuita, essa ferramenta foi escolhida para o desenvolvimento do modelo de partida e parada usada neste artigo. Além disso, o Software Snoopy faz parte de uma família de ferramentas de modelagem, análise e simulação que tem se destacado na literatura no que tange o formalismo em redes Petri.

### **3. Resultados e Discussão**

Neste artigo, o modelo em rede Petri Qualitativa (QPN – Qualitative Petri Nets) explicita parte do processo de partida e parada de uma turbina hidrelétrica. O modelo representa os estados e os passos necessários para a execução de manobras de partida e parada de forma a assegurar o desempenho dos equipamentos envolvidos na geração de energia através das turbinas.

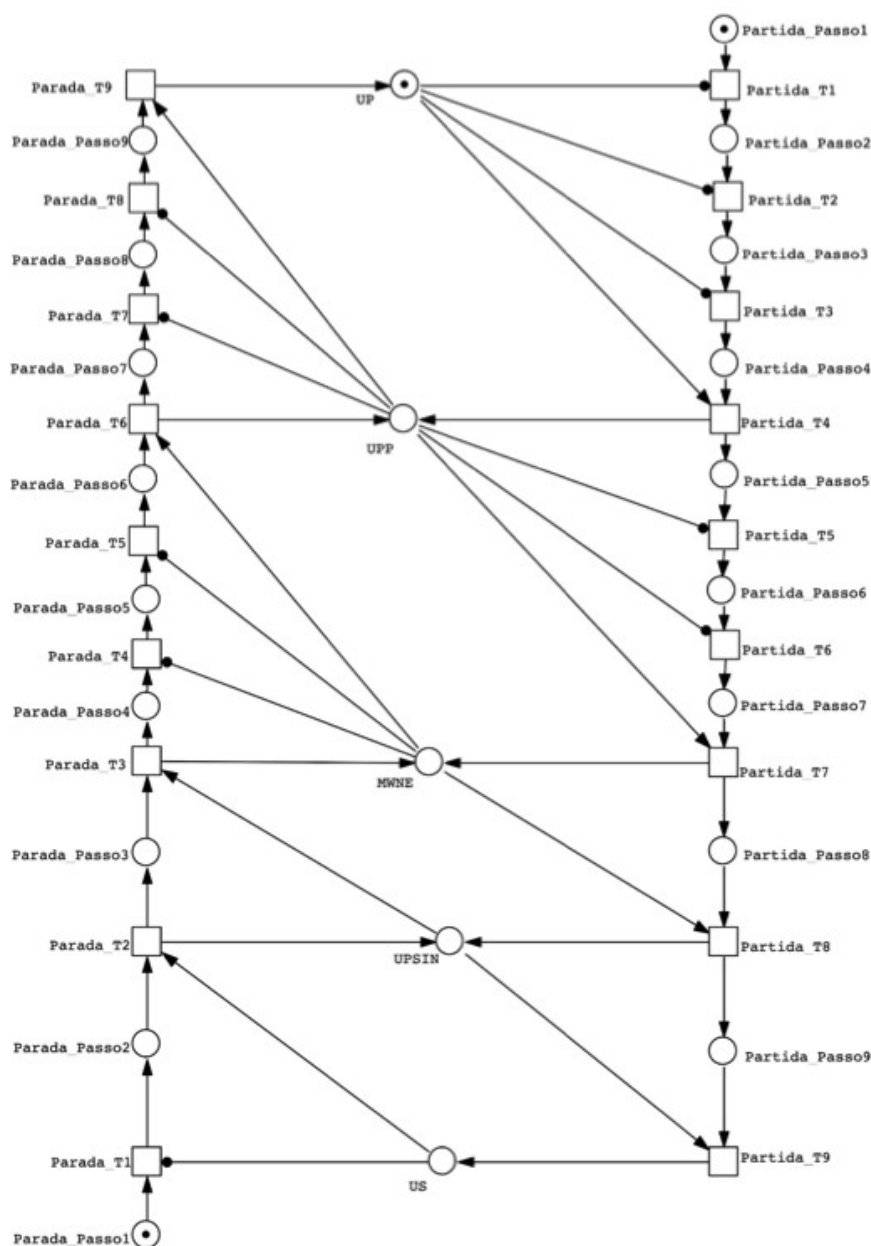
Para a modelagem, foram definidos que os estágios de partida e parada da unidade geradora (UP, UPP, MVNE, UPSIN e US) bem como os passos de ativação (que levam o sistema a migrar a cada um desses estados) serão representados na rede pelo nó estado (lugar ou posição). A operação de cada equipamento nos diversos estágios e passos da unidade geradora é apresentado na rede pelo nó de transição. A marcação em cada estado indica que os pré-requisitos de cada estágio de partida e parada estão satisfeitos bem como o passo ativo



no momento. A figura 3 apresenta o modelo desenvolvido utilizando a ferramenta Snoopy [12].

No modelo foram representadas a ordem e as relações de precedência, concorrência ou assíncrona entre os passos de ativação e os estágios de partida e parada. Logo, o estado UP está conectado às transições Partida\_T1, Partida\_T2 e Partida\_T3 por um arco de leitura. No modelo isso representa que, para que cada passo seja executado, é necessário verificar se as pré-condições no estágio UP foram cumpridas. Cada passo é executado sequencialmente (respeitando as pré-condições) e a mudança no estado da unidade geradora (de UP para UPP) se dá após a transição Partida\_T4 consumir as marcações em seus pré-estados (UP e Partida\_Passo4) e produzir marcações nos seus pós-estados (UPP e Partida\_Passo5). Para o modelo, isso indica que a unidade geradora passou do estágio "parado" para o estágio "pronto para partir". Nesse caso, a marcação no estado UPP indica que os pré-requisitos foram cumpridos e que o sistema encontra-se no passo 5. Essa dinâmica no fluxo das marcações ocorre ao longo da rede, indicando que a mudança nas etapas de ativação de cada estágio da unidade geradora (que é dada sequencialmente através dos passos) é feita passo a passo.

Uma vez o modelo chegando ao estado US (unidade sincronizada) conclui-se que o sistema está apto a gerar energia e ativo. Por consequência, pode ser parado, já que há no estado Parada\_passo1 uma marcação indicando que os pré-requisitos dessa etapa foram cumpridos.



**Figura 3:** Modelo em QPN do módulo de partida e parada da unidade geradora

Nesse caso, o processo de parada acontece diretamente após a unidade estar sincronizada (US). Conforme o fluxo das marcações no modelo vai avançando, o sistema vai mudando do processo de partida até o processo de parada, sendo finalizado com uma marcação no estado UP. Essa dinâmica não é contínua, isso porque existe apenas uma marcação nos estados Partida\_Passo1 e Parada\_Passo1, sendo que os mesmos não são (re)alimentados pelo modelo. Essa foi uma decisão na modelagem pois o intuito do mesmo para este trabalho é mostrar o fluxo do sistema e analisar a sua estrutura.



Como parte do processo de modelagem, a verificação e validação do modelo é uma etapa essencial para comprovar a semelhança entre o modelo proposto e o sistema real. Para um modelo discreto em redes Petri, uma análise qualitativa da rede tem como base analisar propriedades estruturais dos nós bem como o comportamento da rede, considerando o possível fluxo das marcações nos estados. As propriedades estruturais não são dependentes da marcação e são utilizadas apenas para analisar as estruturas dos modelos. São diretamente dependentes das disposições dos estados, transições e arcos. Elas podem ser consideradas como uma verificação de consistência inicial visando checar se o modelo adere à modelagem em termos dos pressupostos do problema e de suas diretrizes. Já as propriedades comportamentais de uma Rede Petri determinam o comportamento do modelo do sistema. Também são dependentes da estrutura da rede qualitativa e da marcação inicial, porém, não dependem do aspecto temporal [4, 10].

Para analisar do modelo de partida e parada, foi utilizado uma ferramenta de análise da mesma família do Snoopy, chamada Charlie [11]. A tabela 1 apresenta o resultado completo da análise do modelo de partida parada. Desse resultado, é possível destacar as seguintes características da rede modelada: ORD (Ordinária), HOM (Homogênea), limitadas por nós (FT0,TF0, PF0), Conectada (CON), Limitada Estruturalmente (SB), Limitada por marcações (k-B e l-B), sem conflito (DCF) e sem nó isolado (DTr).

**Tabela 1:** Resultados após análise no Charlie

PUR	ORD	HOM	NBM	CSV	SCF	FT0	TF0	FP0	PF0	CON	SC	NC
N	Y	Y	N	N	N	Y	Y	N	Y	Y	N	ES
STP	CPI	SB	k-B	l-B	DCF	DSt	DTr	LIV	REV	SSI	SCCS	SEQS
N	N	Y	1	Y	Y	1	Y	N	N	Y	15	18

Analisando esse resultado, nota-se que o modelo proposto é considerado homogêneo e ordinário, ou seja, não há multiplicidade de valores na rede, todas as pré-condições possuem o mesmo peso. Isso quer dizer que para cada estágio há uma condição a ser cumprida e não uma multiplicidade de condições. Essa é uma característica da simplificação do modelo



inicialmente definida. Neste modelo não foram considerados os vários pré-requisitos de cada estágio (UP, UPP, MVNE, UPSIN, US) o que garante a homogeneidade da rede. Outra característica estrutural refere-se à limitação dos nós, onde, para cada transição, há um pré-estado e um pós-estado (FT0 e TF0) bem como cada estado é seguido por uma transição (PF0). Isso garante que o modelo é finito, ou seja, uma vez finalizado o processo de partida, o processo de parada irá ser executado até seu fim e, por consequência, o fim do modelo (a marcação tem um nó inicial e um nó final). Outra característica ligada a estrutura do modelo está relacionada à conexão de cada nó. O modelo analisado é uma rede conectada, indicando que há um fluxo/caminho do início da rede (processo de partida) ao fim da rede (processo de parada) onde todos os estados precedem uma transição e uma transição conecta um estado. Analisando o comportamento da rede, o modelo é limitado por uma única marcação, ou seja, apenas uma característica determina as pré-condições e o resultado de cada etapa cumprida (passos). Mais uma vez essa é uma característica da decisão de modelagem, que pode ser facilmente estendida de acordo com as informações do sistema. Essa rede também é considerada segura e não possui nós isolados (dead transitions) além de não possuir acúmulos de marcações. Isso quer dizer que nenhuma atividade do sistema é isolada e todo estágio é executado (sequencialmente) após os passos de verificação de pré-condições.

#### **4. Conclusão**

Em uma usina hidrelétrica as tomadas de decisões precisam ser rápidas e assertivas. Os operadores necessitam de um sistema ágil e simples que possibilite a representação dos atuadores com precisão. Neste contexto, foi apresentado um modelo qualitativo em redes Petri (QPN - Qualitative Petri Nets) que represente o sistema de partida e parada de uma usina hidrelétrica.

Embora o modelo proposto seja reduzido, a simplicidade e a coerência das redes Petri, possibilita uma fácil e ampla compreensão do processo. Ficou evidenciado que o formalismo das redes Petri a torna uma robusta ferramenta de modelagem gráfica e matemática para representação de processos, possibilitando a expressão de concorrência, paralelismo, não-determinístico, sincronização e restrição. Além disso, uma das vantagens da aplicação de



redes Petri na modelagem de processos é a possibilidade de uma minuciosa análise de cada uma das etapas deles.

Para trabalhos futuros há de se considerar o complemento deste modelo com a introdução dos subsistemas utilizando um modelo hierárquico. Para isso, o formalismo de redes Petri proporciona uma extensão para um modelo quantitativo/estocástico. Essa extensão pode ser um passo para uma modelagem dos sistemas que compõem a unidade geradora a nível físico (considerando suas características de funcionamento). Proporcionando uma ferramenta importante para analisar o sistema de controle de uma usina hidrelétrica e auxiliar na tomada de decisão de seus operadores.

## **5. Agradecimentos**

Os autores agradecem à Energia Sustentável do Brasil pelo apoio para realização desse estudo sob contrato ANEEL PD-06631-0007/2018 e contrato Jirau 064/2018.

## **6. Referências Bibliográficas**

1. André, É., Choppy, C., & Klai, K.: Formalizing non-concurrent UML state machines using colored petri nets. ACM Sigsoft Software Engineering Notes.; 12, 1 - 8; (2012).
2. Arantes, M. G.: Modelagem e análise de linha de montagem de calçados. Dissertação de Mestrado, Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (2006).
3. Barad, M.: Petri Nets – A Versatile Modeling Structure. Applied Mathematics.; 7, 829-839, (2016).
4. Blätke M., heiner M., marwan W. : Tutorial Petri Nets in Systems Biology. 1ª ed. Magdeburg, (2011).
5. Bozek, A.: Using timed coloured Petri Nets for modelling, simulation and scheduling of production systems.; Production Scheduling.; 65, 207 - 230, ( 2012).
6. Carvalho R.V., Verbeek F.J., Coelho C.J.: Bio-modeling Using Petri Nets. A Computational Approach. Theoretical and Applied Aspects of Systems Biology.; 27, 3 - 26, (2018).
7. David, R; alla, H. Petri nets for modeling of dynamic systems: A survey. Automatica, v. 30, n. 2, p. 175-202, (1994).
8. Gorrieri, R.: Understanding Petri Nets: Modeling Techniques. Analysis Methods, Case Studies v. 28 n. 112, p. 102 - 114, (2014).



9. Heiner, M., Herajy, M., Liu, F., c., R., & Schawarick, M.: A Unifyng Net Tool. **Application and Theory of Petri Nets**, v. 6, 308 - 407. (2012).
10. Heiner, M.; donaldson, R.; gilbert, D. : Petri Nets for Systems and Syntetic Biology, v. 5016, n. 6, p. 215-264 (2008).
11. Heiner M., Schwarick M., Wegener J. T.: Charlie – An Extensible Petri Net Analysis Tool. **Application and Theory of Petri Nets and Concurrency**. Bruxelas.:(2015).
12. IEEE Guide for Control of Hydroelectric Power Plants.: IEEE Std 1010-2006 (Revision of IEEE Std 1010-1987). p. 1-81; (2006).
13. Kansou, K.; Rémond, R.; Paes, G.; Bonnin (2017), E.; Tayeb, J.; Bredeweg, B.: Testing scientific models using Qualitative Reasoning: Application to cellulose hydrolysis. *Nature*.v. 5, n. 8, p. 1-8; (2017)
14. Liu, F., heiner, M.: Petri Nets for Modeling and Analyzing Biochemical Reaction Networks. *Approaches in Integrative Bioinformatics: Towards the Virtual Cell*; cap. 10, p. 245–272; (2014).
15. Mancini, F. N. Sistema inteligente para projeto de lógicas de partida e parada de centrais hidrelétricas. *Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia do Paraná*; (2016).
16. Mansoor, S. P., jones, D. I., bradley, D. A., aris, F. C., & jones, G. R.: Reproducing oscillatory behaviour of a hydroelectric power station by computer simulation. *Control Engineering Practice*, 1261-1272; (2000).
17. Miyagi, M. M.; Miyagi, P. E.; kisil, M.: Modelagem e análise de serviços de saúde baseados em Redes de Petri interpretadas. *Production*, v. 11, n. 2, p. 23-39, (2002).
18. Murata, T.: Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*.; 77, 541-580; (1989).
19. Passos, I. O.: Metodologia de Obtenção de Curvas de Colina Usando Redes Neurais para Geração Hidroelétrica. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará*; (2011)
20. PETERSON, J. L.: *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Upper Saddle River. Texas; Prentice Hall; (1981).
21. Popova-Zeugmann, L.: *Time and Petri Nets*. New York. Springer-Verlag Berlin Heidelberg ; (2013).
22. Pózna, A. I., fodor, A., gerzson, M., & hangos K, M.: Colored petri net model of electrical networks for diagnostic purposes. *IFAC-Papers*, 51, 260 – 265; (2018).
23. Sokolowski, J. A., & banks, C. M.: *Modeling and Simulation Fundamentals. Theoretical Underpinnings and Practical*. John Wiley & Sons, Inc; 1 – 24; (2010).



24. Tavana, M.: Dynamic process modelling using petri nets with applications to nuclear power plant emergency management. *International Journal of Simulation and Process Modelling*; 4, 130-138; (2008).
25. Wells, L. Performance analysis using coloured Petri nets. In: *Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, MASCOTS 2002.*, pp. 217-221. *Proceedings. 10th IEEE International Symposium on.* IEEE, Dinamarca, (2002).
26. Xiau, H., & Yu, B.: Hydraulic design of water turbine based on the computational fluid dynamics. In: *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*, pp. 2789-2792, Wuhan, (2010).