

Modelagem de fluxo aeroportuário por meio de sistemas a eventos discretos

Edilson Elias Barbosa Guedes Dias, Flávio Silva Ferro, Giovanni Cangiano

Resumo – O desempenho de sistemas aeroportuários tornou-se cada vez mais impactante em um mundo globalizado. A gestão eficiente do fluxo de aeronaves em aeroportos é de extrema importância, especialmente do ponto de vista financeiro, e, portanto, exige que as operações sejam realizadas da maneira mais rápida possível para aumentar a produtividade das aeronaves. Para alcançar esse objetivo, é essencial compreender o funcionamento dessas operações. Com esse intuito, foi modelado um sistema aeroportuário simplificado, considerando uma única pista para pousos e decolagens, taxiways para chegada e partida, um pátio com capacidade para seis aeronaves, além de serviços de solo realizados após o estacionamento. Para essa modelagem, utilizou-se a abordagem Production Flow Schema (PFS) e redes de Petri, caracterizando o sistema como um modelo a eventos discretos. Essa abordagem também possibilitou a programação de um controlador lógico utilizando a linguagem Ladder Diagram (LD). O modelo desenvolvido mostrou-se robusto e facilmente adaptável, permitindo o estudo de casos específicos de aeroportos, visando a compreensão detalhada de seu funcionamento e a identificação de possíveis pontos de otimização, além de facilitar a automação dos processos.

Palavras-chave – Sistemas aeroportuários; Production Flow Schema (PFS); Redes de Petri; Ladder Diagram (LD)

1 Introdução

O transporte aéreo é um dos modais mais importantes entre os modais de transporte disponíveis. A ANAC registrou que 56,2 milhões de passageiros passaram pelos aeroportos brasileiros entre janeiro e junho de 2024, representando um aumento de 4,4% de aumento em relação ao semestre do ano anterior, demonstrando a significância desse meio de transporte e seu potencial de crescimento (ANAC, 2024). Esse crescimento resulta em um aumento significativo no número de aeronaves e no consumo de combustível, o que, por sua vez, é uma das fontes de poluição atmosférica que mais crescem (MASIOL, HARRISON, 2014). Além disso, a formação de filas para decolagem nas pistas leva frequentemente a atrasos e estima-se que tais atrasos podem gerar custos de até 40 bilhões de dólares por ano à economia dos EUA (BALL et al., 2010).

Durante períodos de alta demanda de partidas, as aeronaves passam uma quantidade significativa de tempo taxiando, o que também contribui para o aumento das emissões de poluentes (CHATI, 2014). As emissões provenientes das fases de pouso e decolagem de um voo tem impacto direto na qualidade do ar local (KHADILKAR, 2012). Por isso, aumentar a eficiência dessas operações é crucial para diminuir a quantidade de combustível queimado.

A rede de Petri é uma ferramenta matemática amplamente utilizada para modelar sistemas discretos, sendo capaz de representar processos com múltiplos estados e transições entre esses estados (CARDOSO, 1997). No contexto de sistemas aeroportuários, a rede de Petri pode ser usada para modelar e simular o fluxo de aeronaves, desde a chegada até o processo de decolagem ou pouso, considerando taxiamento, a utilização de pistas e os serviços de solo. Ao representar o sistema em uma rede de Petri, é possível identificar possíveis gargalos, otimizar o uso dos recursos e prever o impacto de diferentes configurações e cenários no desempenho do aeroporto. Essa abordagem ajuda a visualizar as interações entre os diversos elementos do sistema de forma clara e

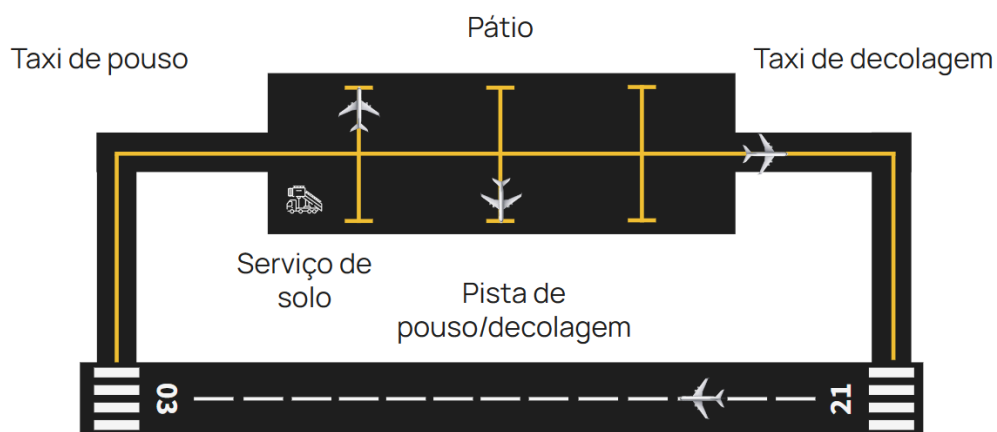
precisa.

Nesse contexto, o estudo do fluxo de aeronaves em aeroportos é crucial não apenas para minimizar custos e atrasos, mas também para reduzir o impacto ambiental. Este trabalho visa modelar um sistema aeroportuário simplificado utilizando uma abordagem baseada em eventos discretos, de forma a analisar o fluxo de aeronaves e identificar possíveis melhorias operacionais. A modelagem utiliza um Production Flow Schema (PFS) e redes de Petri, além de programar um controlador lógico com Ladder Diagram (LD).

2 Modelo estrutural

Primeiramente, foi feito um modelo estrutural de um aeroporto de maneira simplificada. O modelo conta com uma pista para pouso e decolagem, uma taxiway de pouso, uma taxiway para decolagem, um pátio com capacidade para 6 aeronaves e um recurso de serviço de solo, conforme apresentado na Figura 1.

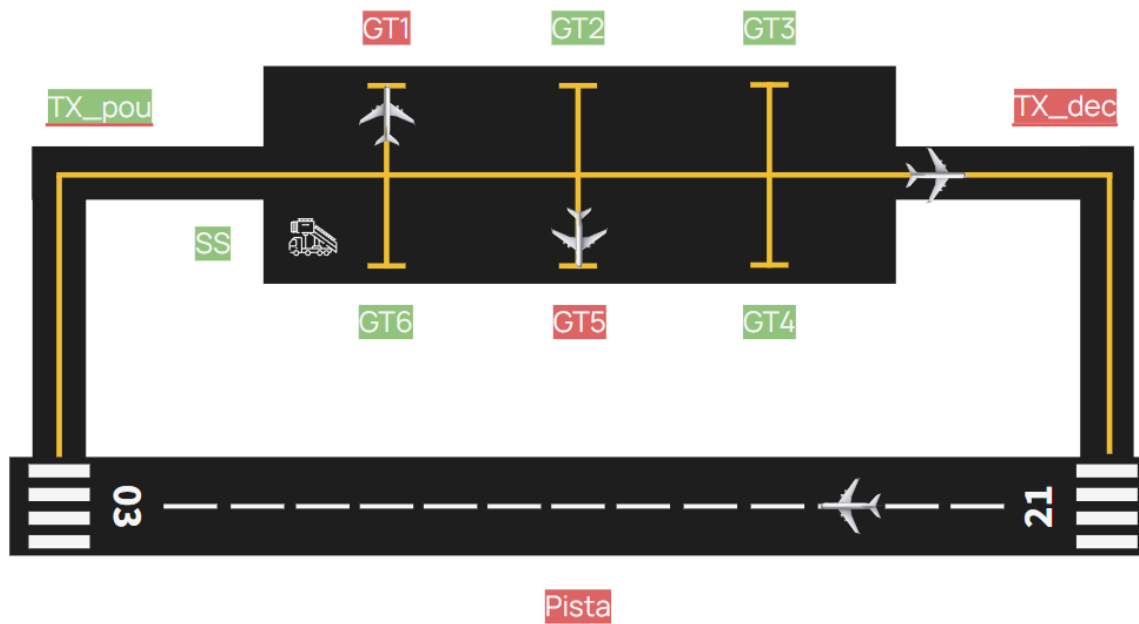
Figura 1 - Modelo estrutural simplificado de aeroporto.



Fonte: Autor, 2024

No modelo, foi considerado a existência de sensores de uso das taxiways, da pista, dos gates e do serviço de solo, como apresentado na Figura 2. Os sinais dos sensores vão ser inputs do dispositivo de controle posteriormente na modelagem.

Figura 2 - Modelo estrutural simplificado de aeroporto com sensores de uso

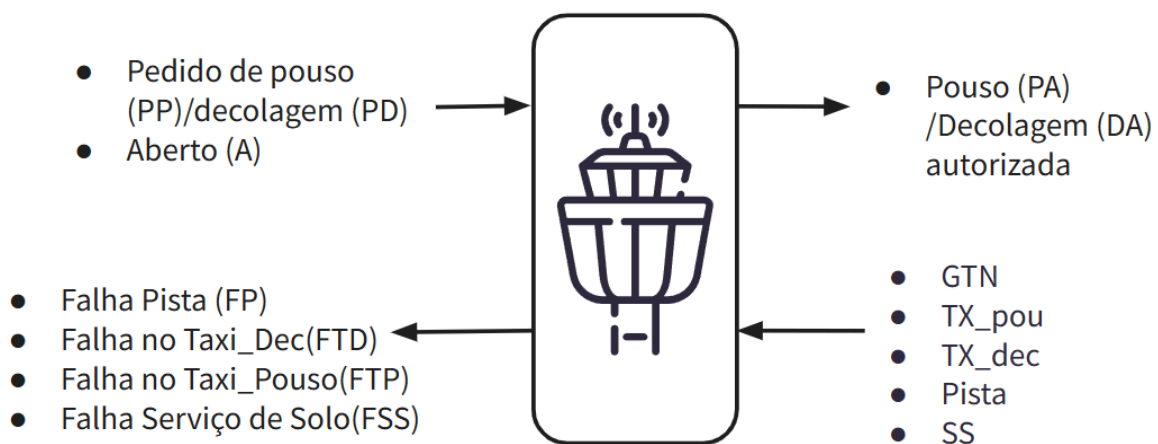


Fonte: Autor, 2024

Assim, pode-se fazer um diagrama dos inputs e outputs do dispositivo de controle. Compõem o dispositivo de comando os pedidos de pouso e decolagem, sinais PP e PD respectivamente, além do sinal “aberto” (A), indicando que o aeroporto está em funcionamento. Quanto ao dispositivo de detecção, temos os sinais dos sensores de uso dos recursos do aeroporto: GTn, onde “n” refere-se ao número do gate, TX_pou, TX_dec, Pista e SS.

Os outputs do dispositivo de comando podem ser divididos nos outputs de atuação e de monitoração. Para os comandos de atuação têm-se os comandos de Pouso Autorizado (PA) e Decolagem Autorizada (DA). E para os sinais de monitoração, têm-se: Falha Pista (FP), Falha no Taxi_Dec (FTD), Falha no Taxi_Pouso (FTP), Falha no Serviço de Solo (FSS). Todos esses sinais são apresentados de forma esquemática na Figura 3.

Figura 3 - Esquema do dispositivo de controle do modelo.



Fonte: Autor, 2024

3 Intertravamentos

3.1 Intertravamentos de processo

Para a modelagem em rede de Petri do sistema proposto, foi utilizada a metodologia PFS. Primeiramente, foi feita uma representação do processo em PFS, conforme Figura 4.

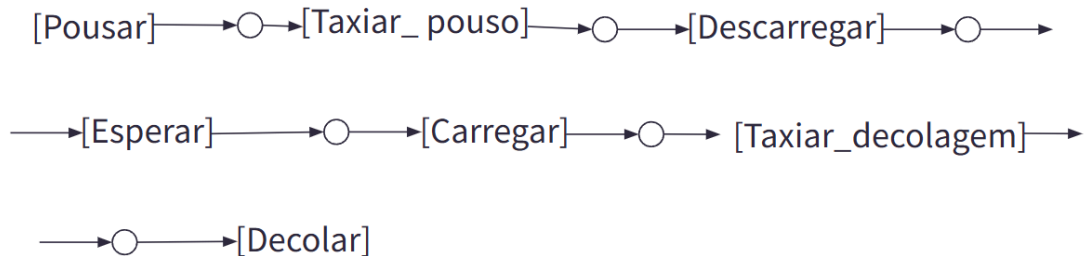
Figura 4 - Representação do processo estudado em PFS.

[Fluxo de aeronaves]

Fonte: Autor, 2024

Em seguida, o processo foi detalhado em atividades/funções, como apresentado na Figura 5.

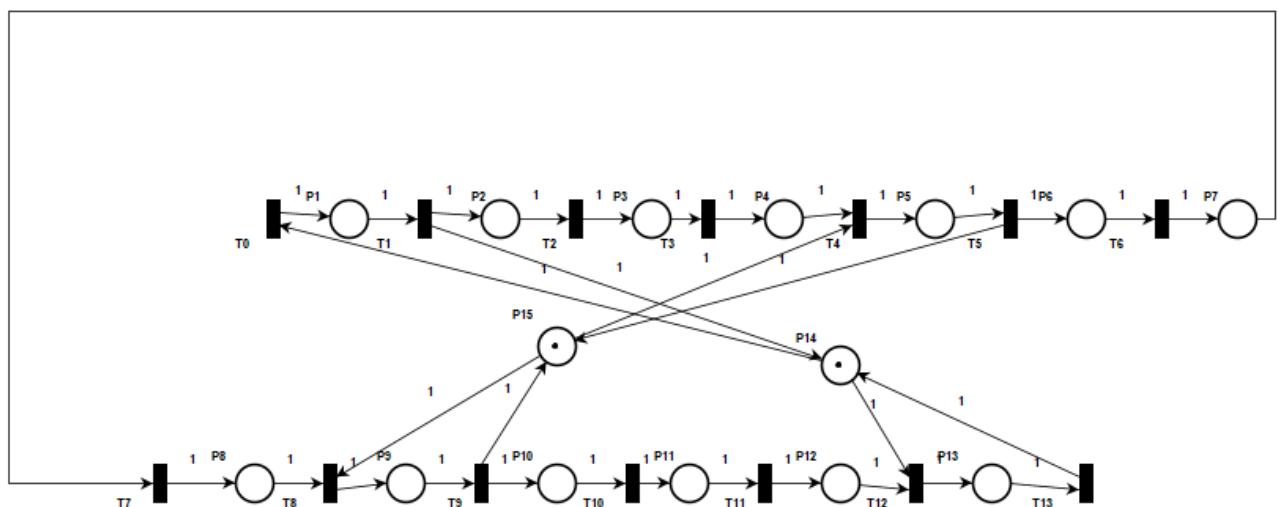
Figura 5 - Representação do processo estudado em PFS.



Fonte: Autor, 2024

Com isso feito, partiu-se para o detalhamento das atividades introduzindo os elementos em rede de Petri e adicionando os elementos de controle de recursos para compartilhamento. A rede de Petri do sistema é apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Detalhamento das atividades e recursos em RdP.

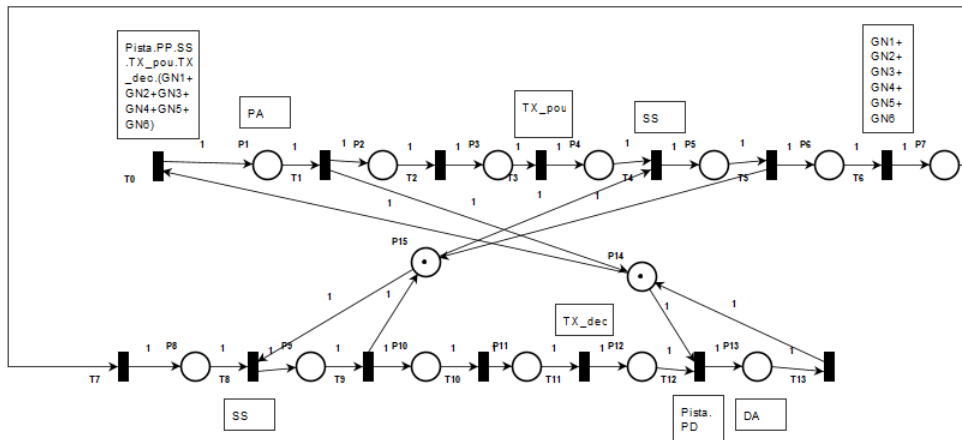


Fonte: Autor, 2024

Por fim, foi feita a representação do fluxo de dados com o ambiente externo, colocando os

inputs e outputs na rede de Petri, como mostrado na Figura 7. Também foi considerado que o lugar P7 tem capacidade de 6 marcações, representando assim a capacidade do pátio de armazenar 6 aeronaves.

Figura 6 - Representação do fluxo de dados com o ambiente externo.



Fonte: Autor, 2024

3.2 Intertravamentos de partida

Para o processo modelado iniciar, é necessário que haja um intertravamento de partida. Para que se inicie o processo, portanto, foi definido que os serviços de solo, as pistas de táxi e a pista devem estar disponíveis e ao menos um *gate* deve estar livre. Isso pode ser representado com álgebra Booleana usando os sinais dos sensores da seguinte maneira, mostrada na Equação 1.

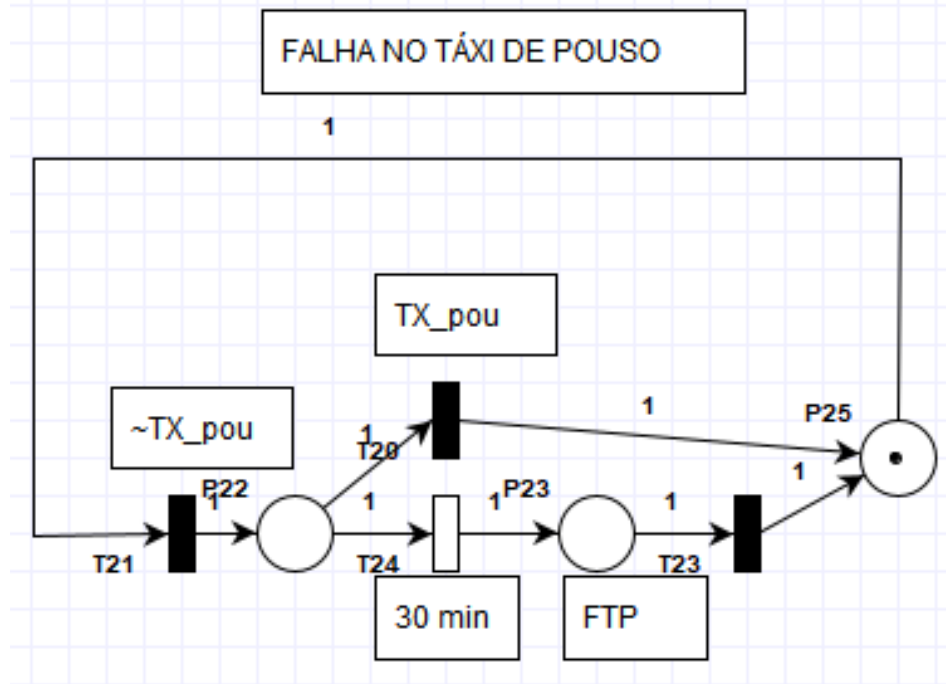
$$Pista*PP*SS*TX_{pou}*TX_{dec}*(GN1+GN2+GN3+GN4+GN5+GN6) \quad (1)$$

3.3 Intertravamentos de funcionamento

É preciso garantir e inferir se ocorre o correto fluxo aeroportuário, para isso são utilizados intertravamentos de funcionamento. Os intertravamentos de funcionamento foram implementados na forma de *watchdog timer* para os processos de taxiamento de pouso e taxiamento de decolagem para detecção de falha técnica nas operações de táxi durante pouso e decolagem, assim como para as operações de carregamento e descarregamento associados a eventuais problemas com os equipamentos/pessoal.

A implementação em RdP dos intertravamentos de funcionamento segue um mesmo padrão, em que há um disparo de transição quando a operação é iniciada e então há concorrência entre duas transições, uma disparada após o fim da operação e outra disparada após o *watchdog timer*, o que indica uma eventual falha de processo, como mostrado na Figura 7 para o intertravamento de processo referente ao táxi de decolagem. É importante ressaltar que o início da operação é disparado quando é verificada a utilização do recurso associado à operação, indicado pelo sinal negado na rede de Petri interpretada pela Figura 7.

Figura 7 - Representação do fluxo de dados com o ambiente externo



Fonte: Autor, 2024

4 Comissionamento do modelo de controle

Foi realizado o comissionamento do modelo de controle por meio de simulações da rede de Petri no software PIPE. A partir disso, constatou-se que não há a presença de deadlocks, não havendo o travamento do sistema. Também pode-se verificar que a rede não é limitada e há a possibilidade de haver mais de uma marcação em um lugar, visto que a capacidade do lugar P7 é de 6 marcações, representando a capacidade do pátio. E por fim, a rede não é reversível após a abertura do sistema, não conseguindo voltar ao seu estado inicial.

5 Programação do controlador em LD

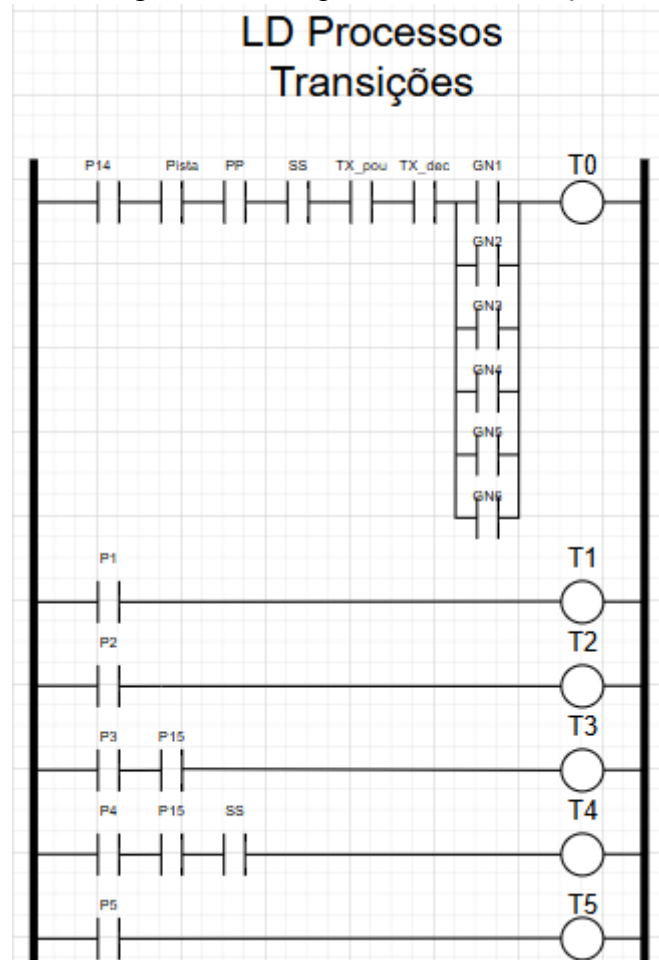
Em seguida, a partir da Rede de Petri devidamente estruturada nos passos anteriores foi aplicada a metodologia de conversão sistemática da rede para a linguagem LD (isomorfismo), possibilitando assim a programação do controlador. Para isso, inicialmente foram inicialmente programadas as transições de acordo com as entradas e os lugares anteriores à transição que necessitam da presença de uma marca para que no disparo da transição a marca passe para os lugares ativados por aquela transição. Por exemplo, para a ativação da transição T0, além da ativação das entradas garantindo a liberação da infraestrutura da pista e pelo menos um lugar na garagem, também é necessária uma marca em P14, representando o compartilhamento de recurso da pista e se ela não se encontra sendo utilizada para um pouso ou decolagem. O diagrama LD resultante para as transições é mostrado na figura 8.

Em seguida, foi feito o LD para os lugares inicialmente sentando que caso nenhum lugar estivesse ocupado, seriam estados os lugares de recursos (situação de partida do sistema) e em seguida foi configurado o avanço da marca segundo o disparo das transições. Isso foi realizado por meio do *set* dos lugares ativados pelas transições e *reset* dos lugares que imediatamente precederam a transição. O LD gerado é representado na figura 9.

Por fim, foram configuradas as saídas, que são simplesmente ativadas pela presença da marca no lugar específico, resultando no diagrama LD da figura 10. Note que essa sequência de processos foi aplicada tanto para a programação do intertravamento de processo do fluxo de

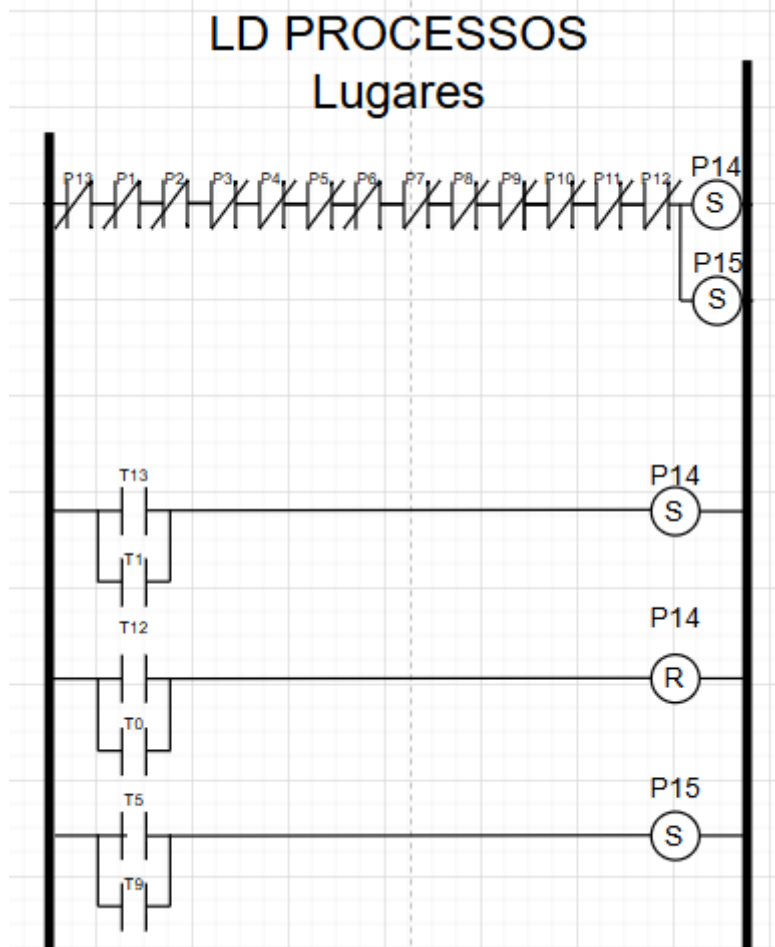
aeronaves, quanto para o de funcionamento para os *watchdogs* de falhas de táxis, pista e serviço de solo. Para os *watchdogs* uma diferença está associada ao uso de timers para o LD de transições, nesse caso a presença de uma marca nos lugares imediatamente anteriores a transição ativa o timer que após o tempo configurado ativa um relé que dispara a transição. Os diagramas LD gerados pelos intertravamentos de funcionamento são mostrados nas figuras 11, 12 e 13, no qual é aplicada a mesma metodologia de conversão para a linguagem LD.

Figura 8 - Diagrama Ladder para as cinco transições iniciais.



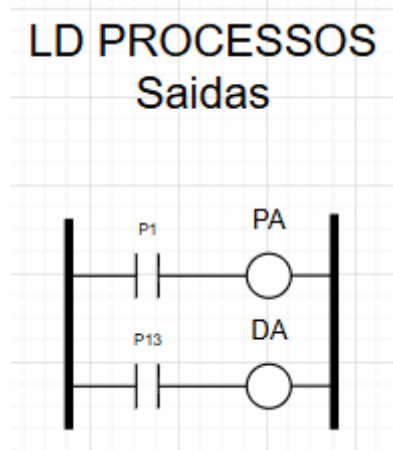
Fonte: Autor, 2024

Figura 9 - Diagrama Ladder para a configuração inicial da Rdp e dos recursos.



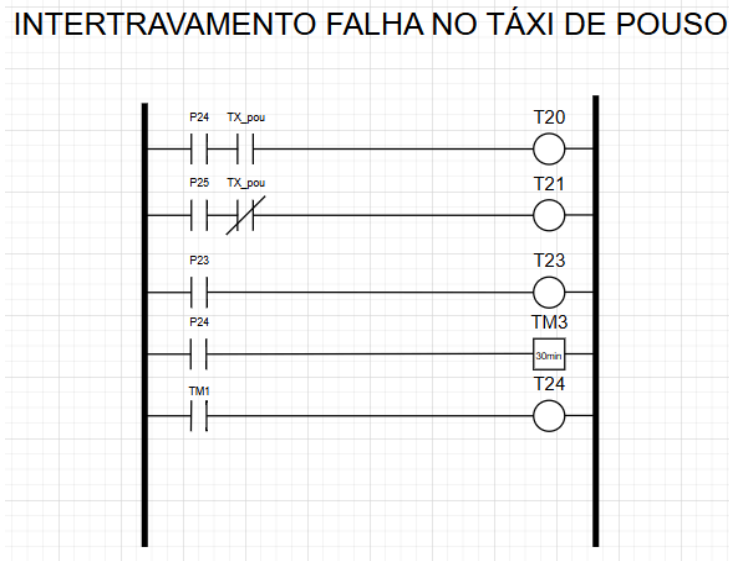
Fonte: Autor, 2024

Figura 10 - Diagrama Ladder para as saídas da rede de Petri.



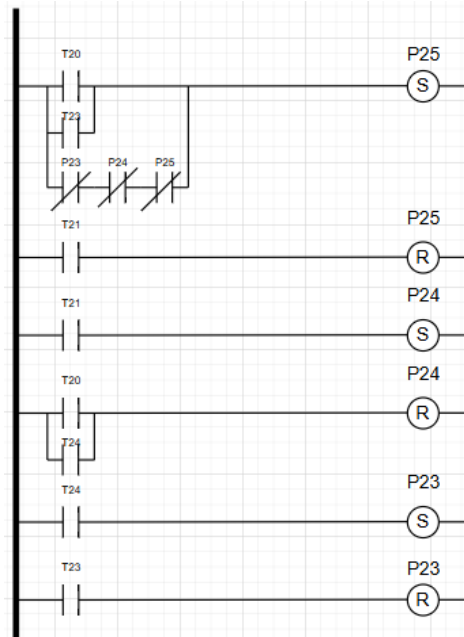
Fonte: Autor, 2024

Figura 11 - Diagrama Ladder para as transições referentes ao intertravamento de processo no táxi de pouso.



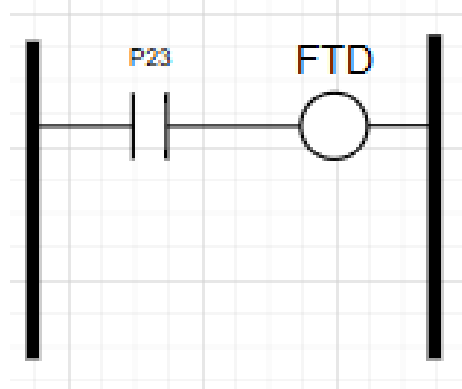
Fonte: Autor, 2024

Figura 12 - Diagrama Ladder para os lugares da rede de Petri no intertravamento de processo do táxi de pouso.



Fonte: Autor, 2024

Figura 13 - Diagrama Ladder para as saídas da rede de Petri do intertravamento de táxi de pouso, indicando ao operador a falha com o sinal FTD.



Fonte: Autor, 2024

6 Conclusão

Concluiu-se, assim, a modelagem do fluxo de aeronaves em aeroportos utilizando a metodologia PFS/Rede de Petri (RdP) para estudar um processo complexo e de grande relevância. O modelo desenvolvido demonstrou-se flexível e facilmente adaptável, podendo ser aplicado em diferentes aeroportos para analisar formas de aprimorar seus processos internos, visando maior eficiência operacional. Além disso, o modelo mostrou-se robusto durante o processo de validação, graças à implementação de intertravamentos que garantiram a segurança do sistema. Por fim, a programação do controlador em Ladder Diagram (LD) pode ser facilmente convertida para outras linguagens, permitindo a integração com sistemas de controle existentes e a automação aprimorada dos processos aeroportuários, contribuindo para operações mais eficientes e seguras.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Demanda e Oferta - Mercado do Transporte Aéreo. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/demanda-e-oferta>. Acesso em: 14 de novembro de 2024.
- BALL, Michael; HOFFMAN, Robert; et al. Total Delay Impact Study. Nextor, 2010, pp. 25-30.
- CARDOSO, J.; VALETTE, R. Redes de Petri. Florianópolis: Editora da UFSC, 1997.
- CHATI, Y. S.; BALAKRISHNAN, H.; et al. Analysis of Aircraft Fuel Burn and Emissions in the Landing and Take-Off Cycle using Operational Data. 6th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2014), 2014, pp. no. ICRAT.
- KHADILKAR, H.; BALAKRISHNAN, H. Estimation of Aircraft Taxi Fuel Burn using Flight Data Recorder Archives. Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 17, no. 7, 2012, pp. 532-537.
- MASIOL, M.; HARRISON, R. M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. Atmospheric Environment, vol. 95, 2014, pp. 409-455.

Title – Modeling Airport Flow Using Discrete Event Systems

Abstract – The performance of airport systems has become increasingly significant in a globalized world. Efficient management of aircraft flow at airports is of utmost importance, especially from a financial perspective, and thus requires that operations be carried out as swiftly as possible to maximize aircraft productivity. To achieve this, it is crucial to understand how these operations function. To this end, a simplified airport system was modeled, considering a single runway for takeoffs and landings, taxiways for arrivals and departures, a parking apron with a capacity for six aircraft, and ground services provided after aircraft parking. This modeling utilized the Production Flow Schema (PFS) approach and Petri nets, characterizing the system as a discrete event model. This approach also enabled the programming of a logical controller using Ladder Diagram (LD). The developed model proved to be robust and easily adaptable, allowing the study of specific airport cases to gain a detailed understanding of their operations, identify potential optimization points, and facilitate process automation.

Keywords – Airport Systems; Production Flow Schema (PFS); Petri Nets; Ladder Diagram (LD)



Edilson Elias Barbosa Guedes Dias. Estudante de Engenharia Mecatrônica na Poli-USP, realizei iniciação científica na área de controle mioelétrico, onde trabalhei com métodos de controle de próteses/exoesqueletos com base em sinais de eletromiografia e *machine learning*. Atuei como monitor em disciplinas de cálculo diferencial e integral. Sou integrante do PET Mecatrônica, participando de atividades de pesquisa e marketing.



Flávio Silva Ferro. Estudante de Engenharia Mecatrônica na Poli-USP, foi vice-capitão do grupo de extensão Keep Flying, tive experiência em otimização multiobjetivo e análise aeroelástica. Já participei de competições nacionais e internacionais de AeroDesign, realizei iniciação científica em modelagem de membranas para separação de gases e estagiei na Embraer na área de projetos estruturais. Também atuei como monitor em disciplinas de programação e mecânica dos fluidos.



Giovanni Cangiano. Estudante de Engenharia Mecatrônica na Poli-USP, sou formado em Ciências Moleculares e concluí uma iniciação científica fomentada pela FAPESP relacionado a análises ômicas no contexto da biologia tumoral.