



## APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE SMART GRIDS À RECONFIGURAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS RADIAIS SELETIVOS SUBTERRÂNEOS<sup>1</sup>

Ronei Eloí Ody França<sup>2</sup>, Mauricio de Campos<sup>3</sup>, Moises Machado Santos<sup>4</sup>, Paulo Sérgio Sausen<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Projeto de pesquisa desenvolvido na Unijuí;

<sup>2</sup> Bolsista de Iniciação Científica Capes/UNIJUI; estudante do curso de pós graduação em Modelagem Matemática;

<sup>3</sup> Professor orientador, UNIJUI.

<sup>4</sup> Professor co-orientador, UNIJUI.

<sup>5</sup> Professor co-orientador, UNIJUI.

### RESUMO

A introdução de *Smart Grids* em sistemas de distribuição de energia elétrica subterrâneos tem sido viabilizada pela tecnologia de informação e comunicação de dados, sensoriamento e controle inteligentes, além da viabilidade econômica de fontes de energia de pequeno porte.. A reconfiguração das redes elétricas de distribuição é crucial para evitar contingências e assegurar uma condição ótima para o fluxo de carga entre unidades geradoras, cargas do sistema e o sistema de proteção. Este projeto propõe o desenvolvimento de uma modelagem computacional utilizando redes neurais artificiais (RNAs) para analisar consumos e demandas pontuais do sistema de distribuição de energia elétrica, por meio de dados acumulados e sensores em tempo real. O objetivo é treinar as RNAs para identificar os melhores caminhos para o fluxo de potência e otimizar o sistema através de chaves de transferência automáticas. A reconfiguração busca equilibrar a energia disponível com a demanda do sistema, considerando perdas técnicas, uniformizando a distribuição de carga, e minimizando desvios de tensão nas barras, promovendo assim melhores condições operativas da rede. Foram simulados alguns cenários de carga para a rede de distribuição analisada, com resultados apresentados e visualizados graficamente, incluindo as melhores configurações de chaves telecomandadas, a quantidade de chaveamentos por operação, níveis de tensão nos barramentos, limites de corrente e redução de perdas de potência ativa.

**Palavras-chave:** *Smart Grids*, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Subterrâneos, Redes Neurais Artificiais (RNAs), Chaves de Transferência Automáticas, Reconfiguração do Sistema de Distribuição.

### ABSTRACT

The integration of Smart Grids into underground electrical distribution systems has been made feasible through advancements in information and communication technology, intelligent sensing, and control, as well as the economic viability of small-scale energy sources. Reconfiguring electrical distribution networks is essential to prevent contingencies and ensure optimal load flow between generation units, system loads, and protection systems. This project proposes the development of a computational model using Artificial Neural Networks (ANNs) to analyze point consumption and demands within the electrical distribution system by leveraging accumulated data and real-time sensors. The goal is to train ANNs to identify







Neurais. Desta forma é possível garantir qualidade ao atendimento de energia elétrica, redução no tempo de transição de chaves e número de operações, segurança na operação evitando instabilidades, pois com a versatilidade da ferramenta de IA empregada, é possível se pensar na aplicação da estrutura a novas atividades de naturezas distintas da atual em andamento. Através de Redes Neurais Artificiais, estes modelos matemáticos serão implementados como entrada, com algoritmos de treinamento e apresentadas as melhores saídas para o sistema ótimo.

As simulações de RNA serão utilizadas por meio da plataforma MATLAB com aplicação da toolbox Neural Networks, que pode ser desenvolvida, através de Interfaces Gráficas do Usuário (do inglês, Graphical User Interfaces (GUIs)) e mediante linhas de comando (script) em arquivos “.m”, sendo considerados os neurônios de entrada, camadas adjacentes e neurônios de saída. Contudo, serão avaliados os resultados, através da análise desempenho na simulação, e viabilizada a implementação de RNAs com algoritmos de treinamento com melhor desempenho e com menor tempo de ativação das chaves automáticas nos processos.

Para tanto, em dependência do estado da rede de distribuição apresentado operando em tempo real, gerando as entradas do sistema que com os melhores caminhos para o fluxo de potência. Com os resultados desejados gerados pelas RNAs, será desencadeada a otimização e com isso aplicado o controle do sistema através das chaves de transferência telecomandadas de reconfiguração.

## **MODELAGEM MATEMÁTICA ATRAVÉS DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS**

O objetivo da Inteligência Artificial (IA) é o desenvolvimento de paradigmas ou algoritmos que requeiram máquinas para realizar tarefas cognitivas, para quais os humanos são atualmente melhores. Um sistema de IA deve ser capaz de armazenar conhecimento, aplicar o mesmo para resolver problemas e ainda adquirir novos conhecimentos através da experiência (HAYKIN, 2001).

Uma RNA tende a ser ajustada para que a aplicação de um conjunto de entradas produza a saída desejada. Para projetar, combina-se os efeitos individuais de todos os neurônios, onde a RNA usualmente se adapta para atingir a funcionalidade desejada a partir de uma ou mais estratégias de aprendizado, as quais vão atuar junto a parâmetros configuráveis (SILVA, 1998).



O aprendizado ocorre quando a rede neural atinge uma solução generalizada para uma classe de problema. Além disso, as RNA são robustas na presença de ruído, onde pequenas mudanças no sinal de entrada ou nos pesos da rede não irão afetar a saída da rede significativamente. (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Concepções de otimização formadas no contexto de redes elétricas de distribuição subterrâneas são definidos como resolver os problemas de restauração, reconfiguração e de planejamento da distribuição. Embora esses problemas compartilhem objetivos semelhantes, eles se referem a horizontes diferentes, pois a restauração se caracteriza por tempo emergencial, a reconfiguração preocupa-se com análise de recursos temporais a curto prazo, enquanto o planejamento forma soluções estratégicas para atender às demandas esperadas no futuro distante, investindo em expansibilidade, capacidade e otimização de controle baseado em eficiência.

A formulação de uma RNA especialista é muito proveitosa para interpretar, classificar, diagnosticar e qualificar o comportamento dos sistemas modelados e, através de experiências direcionar corretamente os esforços na solução almejando com eficiência os problemas complexos de reconfiguração. O objetivo dos algoritmos é extrair corretamente as informações sobre o problema e, por meio de inferências, direcionar o processo de resolução às ações componentes do sistema, isto é, determinar continuamente quais ações previstas deverão ser executadas para a resolução do problema de reconfiguração.

Com isso, baseado nas soluções e melhorias adquiridas pelas RNAs no método de reconfiguração otimizada, o sistema duplo radial poderá obter um rendimento mais apropriado e eficiente. Em que o método de planejamento de expansão, será beneficiado de forma integral, onde atualmente necessita-se de novas fontes geradoras, reconduzimentos de cabos e necessidade de intervenção de obras civis em centros populacionais, poderão ser avaliados como os meios mais apropriados como direcionamento de cargas ou de fontes geradoras, análise do comportamento dos perfis de consumidores e atribuir uma demanda máxima a ser atingida.

## **MODELAGEM DE UM TRECHO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEO**

O conjunto de configuração da rede, a carga e a geração são frequentemente escolhidas para corresponder a uma condição operacional conhecida, de modo que os resultados possam

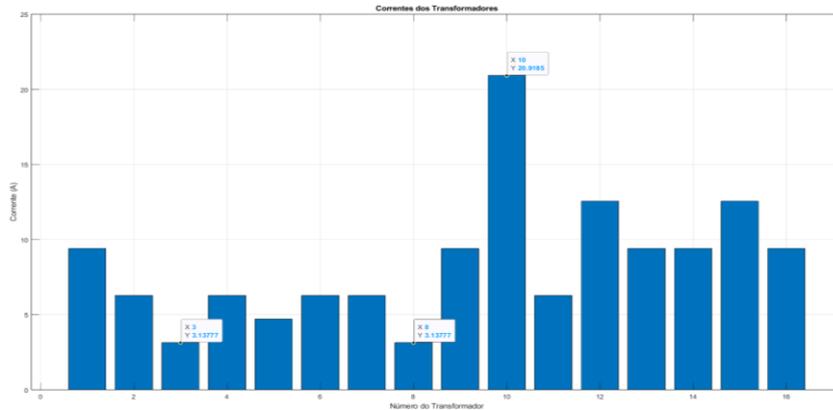








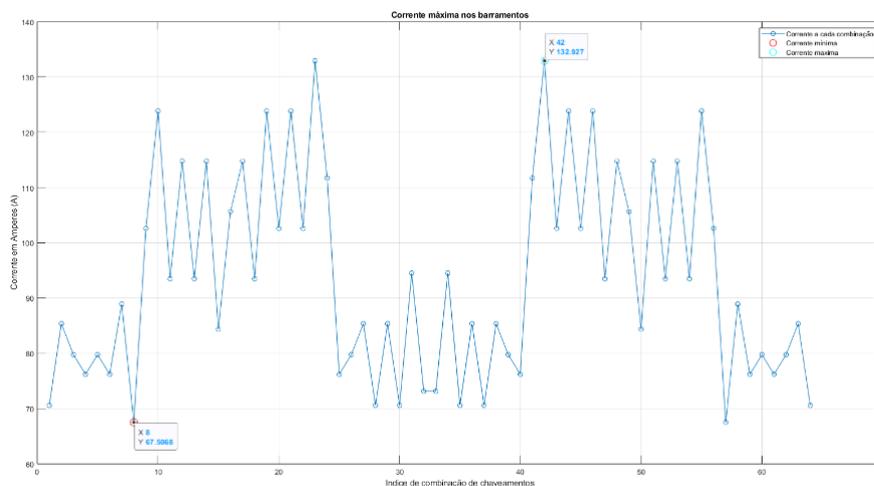
Figura !! – Corrente nos ramos condutores terminais de cada carga



Fonte: Autoria própria (2024).

Após serem analisados os pontos de entrega das cargas, foi realizada a análise dos trechos que vão retrocedendo até a subestação alimentadora. Para uma correta análise da capacidade de corrente nos barramentos de conexão, foram apresentados apenas os dados de máxima corrente em cada trecho analisado, ou seja, os dados apresentados no gráfico não correspondem a um trecho único com todas essas variações, mas sim a máxima corrente em um trecho no chaveamento atual. Como destacado no chaveamento de combinação número 8, teve a corrente mínima entre todas as 64 combinações com uma corrente de 67,51A. A máxima corrente no sistema de distribuição analisado foi de 132,93A, obtida na combinação número 42 entre as chaves de transferência.

Figura !! – Corrente nos barramentos de conexão do sistema de distribuição

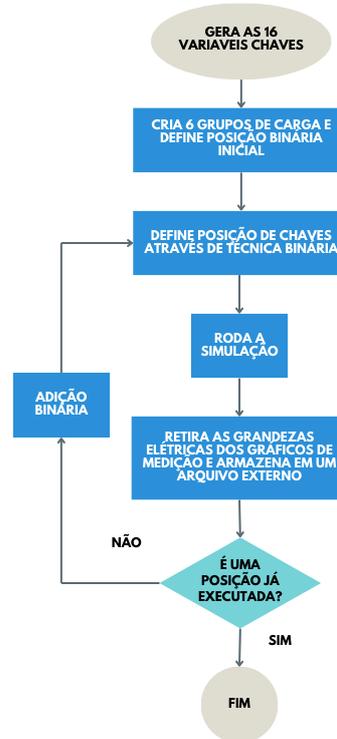


Fonte: Autoria própria (2024).



Como a modelagem anteriormente devolvida pelo GAIC gera um cenário aproximado do real, cada processo de simulação requer um tempo de execução dificultando ao operador simular cada possibilidade de mudança de posição de chave de carga. Em um exemplo clássico, o operador demora 20 segundos para mudar a posição de chave, executa a simulação com tempo aproximado de 60 segundos e recebe através dos medidores nas chaves todas as medidas em função do tempo. Então, este deve analisar todos os gráficos para retirar os dados de interesse, destes dados analisa com sua experiência e aplica conhecimento para verificar qual a melhor posição possível da chave de carga.

Figura !! – Fluxograma de coleta de dados do sistema de distribuição

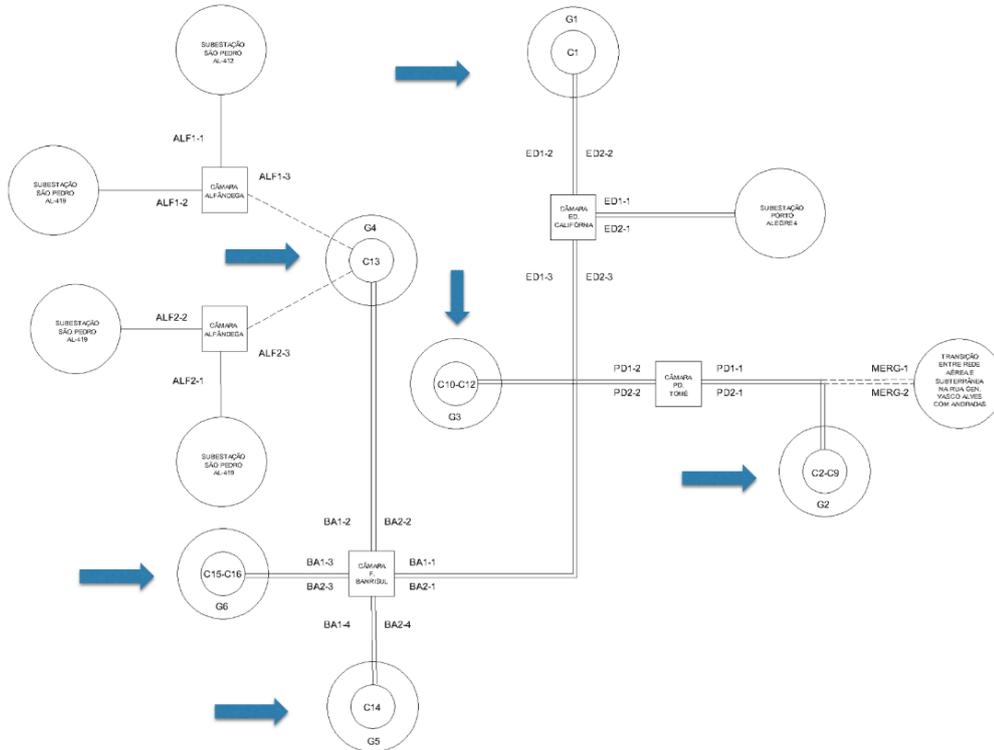


Fonte: Autoria própria (2024).

Em um processo de reconfiguração através de *smartgrid*, a coleta de dados deve ser através dos sensores e medidores atribuídos as chaves de transferência, de forma rápida e específica. Para isso, foi desenvolvido um código de programação onde o operador define os valores de potência das cargas e roda o fluxo de potência para todas as chaves, retirando as grandezas elétricas necessárias para a RNA e gera num arquivo externo conforme fluxograma apresentado na figura !!.



Figura !! – Sistema de distribuição simulado com seus grupos de carga



Fonte: Autoria própria (2024).

A simulação de chaveamentos levou como base todas as possibilidades de chaveamentos divididos de 16 chaves de cargas, sendo que conforme as chaves telecomandadas tem posições estratégicas bem definidas as posições de cargas mudam de acordo com o grupo de chaves cargas definidos. Sobre os grupos de cargas, foram definidos como G1 a chave de carga número 1, G2 as chaves de carga número 2 a 9, G3 as chaves de carga número 10 a 12, G4 a chave de carga número 13, G5 a chave de carga número 14, G6 as chaves de carga número 15 e 16, conforme figura !!.

Através destes 6 grupos de cargas foram realizadas todas as possibilidades de chaveamentos, através de uma técnica binária onde todas as chaves podem ter as posições 1 ou 2 (alimentador do barramento 1 ou alimentador do barramento 2, respectivamente). A totalidade de chaveamentos corresponde ao número de chaves ao quadrado, ou seja, são 64 possibilidades para cada grupo de carga.

As perdas nas linhas de distribuição de modo genérico representam as perdas de potência ativa nos trechos entre os alimentadores e as cargas. Conforme a simulação apresenta



pontos de medição nos alimentadores e nas cargas, usou-se do método matemático de soma das potências dos alimentadores subtraindo a soma das potencias nas cargas, gerando a resultante definida de perdas das linhas de distribuição.

O estudo baseia-se em melhorar o perfil de tensão respeitando os limites de operação e reduzindo perdas nas linhas de distribuição. Quanto ao perfil de tensão, existe um limite estabelecido para o correto funcionamento do sistema de distribuição definido entre 0,97 P.U. e 1,05 P.U., ou seja, entre 97% e 105% da tensão limite da linha definida em 13,8 kV. Como a potência da linha de distribuição emerge dos alimentadores em direção as cargas, os maiores valores de tensão devem ser avaliados nos alimentadores e os menores valores de tensão devem ser avaliados nas cargas.

Foram simulados vários cenários para avaliar estas perdas, tanto de forma ordenada e variável, quanto de forma desorganizada e fixa. Foi desenvolvido um perfil de estudo onde as cargas foram definidas como as potências dos transformadores, conforme comentado anteriormente, mas com 10 valores fixos de carregamento sendo de 0,1 P.U. a 1,0 P.U. Além disso, foram forçadas variações aleatórias entre 90% e 110% destes valores de carga em qualquer combinação de chaves, assimilando um cenário real.

Foram geradas 10 tabelas de resultados, onde cada tabela tem as cargas definidas em 0,1 PU a 1,0 PU e as variações para causar incerteza nos resultados, sendo 64 resultados por tabela, conforme tabela exemplo descrita na figura !!. Logo, temos 640 resultados para alimentar a rede neural e tentar gerar a melhor combinação possível para um cenário de carga.

Figura !! – Exemplo de Tabela de dados resultantes da coleta de dados

N	Status das Chaves																Perda de Potência (VA)	Tensão Máxima (V)	Tensão Mínima (V)	Potencia Ativa (W)	FP Cargas	Potencia Aparente (VA)
	Grupo de Cargas																					
	G1	G2					G3		G4	G5	G6											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16							
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1902,75126	13968,159	13984,018	2982771,4	0,920001	2984674
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2097,45196	13929,805	14012,915	2949996,45	0,920001	2952094
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2021,82099	13944,548	14007,324	29899326,4	0,920001	2991348
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1993,66576	13952,18	13997,327	2993236,43	0,920001	2995230
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1907,09854	13946,095	13998,888	2915496,39	0,920001	2917403
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1887,50277	13955,989	13989,585	2948501,42	0,920001	2950389
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2133,09896	13923,929	14023,136	2962071,4	0,920001	2964204
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1897,07547	13970,139	13975,085	2947351,4	0,920001	2949248
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2424,15389	13891,659	14052,017	3034291,52	0,920001	3036716
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	3055,27606	13833,918	14084,036	2922626,62	0,920001	2925682
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	2110,29301	13914,674	14026,443	2952066,46	0,920001	2954177
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2575,46442	13860,64	14065,248	2911701,56	0,920001	2914277
...																						
53	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2815,78702	13860,685	14073,981	3021066,58	0,920001	3023882
54	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2144,18535	13912,013	14027,682	2941486,46	0,920001	2943631
55	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	3008,8787	13834,675	14082,667	2911011,62	0,920001	2914021
56	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2330,82441	13889,58	14048,412	2973801,51	0,920001	2976132
57	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1922,32581	13973,538	13980,419	3000021,41	0,920001	3001944
58	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2114,7762	13924,247	14020,472	2936771,4	0,920001	2938886
59	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1963,64322	13952,73	13993,744	2962301,42	0,920001	2964265
60	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1939,44992	13939,966	14006,761	2937576,39	0,920001	2939516
61	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1810,64644	13952,932	13984,69	2867541,41	0,920001	2869352
62	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2136,13779	13947,013	14012,085	3064076,41	0,920001	3066213
63	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2043,71643	13927,509	14011,255	2909976,44	0,920001	2912020
64	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1965,24612	13967,476	13986,898	3004621,41	0,920001	3006587

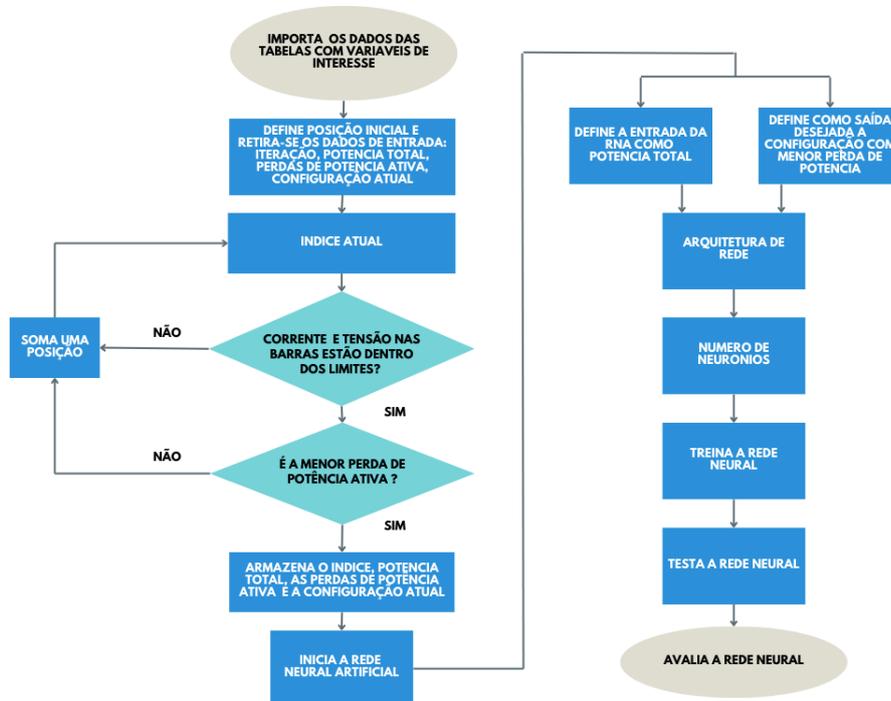
Fonte: Autoria própria (2024).



Com o intuito de treinar a nossa RNA, foi desenvolvido um algoritmo para implementar os dados das tabelas e definir os parâmetros da RNA, conforme fluxograma descrito na figura !!. O algoritmo retira os dados da tabela, acha o cenário onde a combinação tenha menor perda e faz com que para essa situação de carga seja implementada como entrada.

Outro fator chave é o respeito a duas condições específicas de capacidade de corrente dos condutores e análise do perfil de tensão, onde caso alguma das restrições não sejam contempladas, essa condição não satisfaz a combinação. Simulando o cenário de 0,1 PU é encontrada a menor perda de potência, atribuída a combinação desta menor perda a todas as combinações com patamares de carga similares, treinando a RNA para que interprete este cenário de carga como a melhor saída desejada. Com isso foram implementadas 640 valores a minha rede e desejado como saída as 10 melhores combinações. E foram testados valores dentro e fora do cenário para testar a eficácia da RNA.

Figura !! – Fluxograma do código para construção da RNA



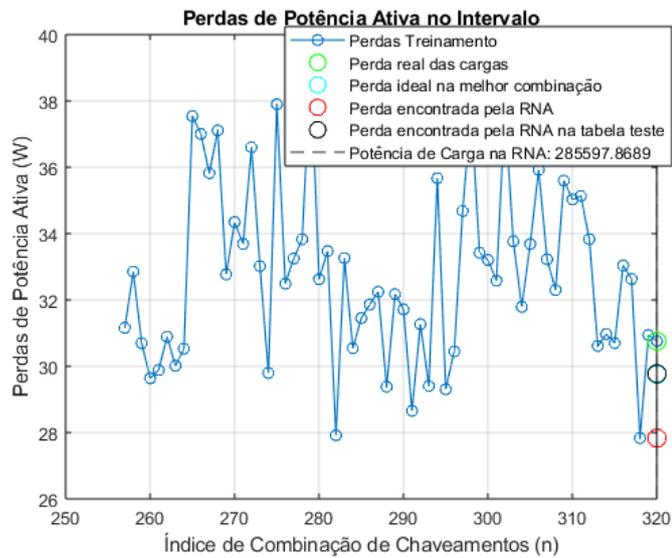
Fonte: Autoria própria (2024).

Em um cenário de simulação com a RNA descrita, são lidos os dados de potência de treinamento em um modelo padrão de dados de treinamentos. Já nas cargas teste, podem ser



descritos uma potência individual como potência total ou ainda apresentada uma tabela com as potências para teste onde a RNA estipula uma resultante baseada apenas no treinamento

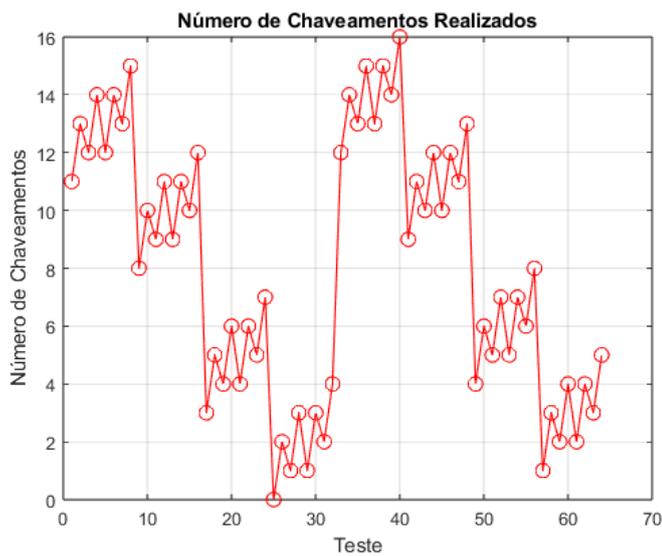
Figura !! – Dados resultantes da RNA comparados com dados fornecidos



Fonte: Autoria própria (2024).

Outro fator de suma importância é o número de chaveamentos necessário para encontrar essa configuração ótima. Onde, podem ser avaliados os custos de chaveamento em comparação as perdas de potência ativa, e determinar se é viável financeiramente considerar essa nova configuração ou manter a configuração anterior.

Figura !! – Chaveamentos necessários para configuração ótima

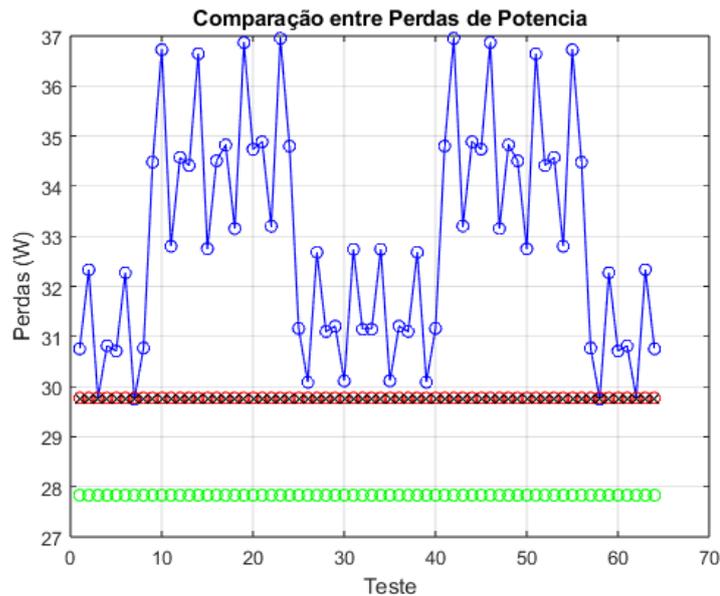


Fonte: Autoria própria (2024).



Através de dados experimentais simulados pelo modelo desenvolvido pelo GAIC ou dados retirados pelo âmbito real de operação conseguimos explorar quais as melhores configurações das chaves telecomandadas irão gerar as menores perdas de potência. Na figura !! foram simuladas 64 situações de carga, As perdas descritas em verde são as perdas fornecidas no treinamento, as perdas descritas em azul são as perdas reais das cargas simuladas e as perdas descritas em vermelho são as perdas encontradas pela RNA após a reconfiguração. Sendo que, em demarcado com um “x” na cor preta estão as menores perdas descritas para esse patamar de carga simulado.

Figura !! – Comparação entre perdas de potência de teste, treinamento e resultante



Fonte: Autoria própria (2024).



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem várias formas de aproveitar esse estudo, sendo de grande importância na operação. A primeira será o operador não ter conhecimento e através das cargas de entrada, é definida a melhor forma de chaveamento onde ele consegue otimizar o processo. Outra será verificar em diferentes curvas de carga, analisando quais os horários de maior perda do sistema e provocando o chaveamento para otimizar o processo.

Em sistemas de distribuição atuais o operador do sistema estima o valor de carregamento na rede baseado na experiência, curvas de carga, e na medida do valor de corrente na saída dos alimentadores durante o estado restaurativo. O projeto trata de uma topologia em que as RNAs devem ser capazes de analisar os consumos através de dados acumulados e analisadores de sinal e sensores em tempo real, a fim de estipular consumos e demandas pontuais em grandes centros de carga e com isso, controlar direta ou indiretamente o sistema de distribuição através das chaves telecomandadas, ou seja, por meio do operador do sistema de distribuição ajudando o mesmo ou simplesmente pelo aprendizado de máquina e operação com o controlador das chaves remotamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ECKHARDT, Gustavo. Análise do gerenciamento pelo lado da demanda em uma rede de distribuição subterrânea de energia elétrica em média tensão.** 2022. 49-87 f. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Engenharia Elétrica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2022.

**CAMPOS, Mauricio de. Sistema de descoberta de conhecimento para apoio à tomada de decisões aplicado ao controle de operações do sistema duplo radial subterrâneo de média tensão.** 2011. Relatório técnico. Acesso em: junho 2011. Haykin 2001

**SILVA, Ivan Nunes da; SPATTI, Danilo Hernane; FLAUZINO, Rogerio Andrade. Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas.** São Paulo: Editora Artliber, 2010.

**SILVA, Nelson Rodrigues; SILVA, Luis Gustavo Wesz da; OLIVEIRA, Marcelo Escobar de; VIAJANTE, Ghunter Paulo; ROCHA, Hugo Xavier. Desenvolvimento de um algoritmo como solução para o problema de restauração de sistemas de distribuição radiais.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 9, p. 49-53, 2021.

**HAYKIN, Simon. Redes neurais: princípios e prática.** Porto Alegre: Editora Bookman, 2001.