

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Sistema Inteligente para Controle e Monitoramento
de Malha de Potência para Usinas Termoelétricas Baseado
em Método de Apoio à Decisão Multicritério**

Ricardo Barbosa de Almeida Campos

Itajubá, Março de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Ricardo Barbosa de Almeida Campos

**Sistema Inteligente para Controle e Monitoramento
de Malha de Potência para Usinas Termoeletricas Baseado
em Método de Apoio à Decisão Multicritério**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Mestre em
Ciências em Engenharia Elétrica**

**Área de Concentração:
Automação de Sistemas Elétricos Industriais**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva

**Março de 2020
Itajubá-MG**

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva por todo o apoio durante esse projeto, mesmo durante esse ano difícil.

Agradeço ao Me. Frederico Assunção pelo suporte e acompanhamento no meu dia a dia, sendo uma importante figura de suporte.

Agradeço o meu irmão Arthur Campos pela compreensão e tempo nessa caminhada e pelo suporte emocional nesses tempos difíceis.

Agradeço o meu pai, José Carlos, e minha mãe, Vera Cristina, por serem tão presentes durante a minha vida e apoiarem toda a minha caminhada acadêmica.

Agradeço ao programa de P&D da ANEEL e à UTE CEPASA pela oportunidade de participar do desenvolvimento e permitir os testes em campo.

Sumário

Sumário.....	ii
Índice de Figuras	iv
Índice de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vi
Lista de Siglas e Abreviações.....	vii
Resumo	viii
Abstract.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Considerações Iniciais	10
1.2. Justificativa.....	11
1.3. Objetivos e Contribuições	12
1.4. Organização da Dissertação.....	12
2. OPERAÇÃO DE TERMOELÉTRICA NO SI.....	14
2.1. Modalidades de Operação das usinas	14
2.2. Especificações dos Geradores	17
2.3. Apuração de indisponibilidades programadas e forçadas.....	18
3. AHP	20
3.1. Fundamentação	20
3.1.1. Elementos.....	21
3.2. Proporção de consistência	25
3.3. Método das potências	26
3.4. Exemplo: Seleção de critérios genéricos utilizando o AHP	27
4. SISTEMA INTELIGENTE DE RANQUEAMENTO	31
4.1. AHP Modificado	31

4.2.	Processamento dos dados	32
5.	APLICAÇÃO DO SISTEMA	38
5.1.	MODBUS	38
5.2.	CAN BUS	39
5.3.	Sensores de Fluxo.....	40
5.4.	CLP concentrador e switch de rede	41
5.5.	Estrutura da rede.....	42
5.6.	Sistema de banco de dados	43
5.6.1.	Banco de dados relacional.....	43
5.6.2.	Linguagem SQL	45
5.6.3.	Estrutura e tabelas do banco de dados.....	45
5.7.	Sistema supervisorio.....	46
5.8.	Linguagem Python.....	48
5.9.	Implementação do sistema inteligente.....	49
5.10.	Algoritmo de classificação	51
5.10.1.	Inicialização	51
5.10.2.	Acesso ao banco de dados	52
6.	RESULTADOS	54
6.1.	Cenário 1	55
6.2.	Cenário 2	56
6.3.	Cenário 3	58
7.	CONCLUSÕES	61
7.1.	Sugestões para Trabalhos Futuros	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
	APÊNDICE A.....	66

Índice de Figuras

Figura 1: Estrutura hierárquica genérica do AHP.	23
Figura 2: Matriz de decisões genérica.	25
Figura 3: Fluxograma do processo geral de ranqueamento.....	34
Figura 4: Fluxograma para cálculo das variáveis de um gerador.....	36
Figura 5: Local de instalação do medidor de combustível – entrada.	41
Figura 6: Sensor Reed Switch sobre rotor magnético.	42
Figura 7: Dois sensores Reed Switch sobre rotor magnético.	42
Figura 8: Estrutura de redes proposta.	44
Figura 9 :Exemplo de uma tabela de dados individuais para cada geradora	47
Figura 10: Tela inicial do supervisorio.....	48
Figura 11: Tela individual para o gerador 89.	49
Figura 12: Tela inicial do programa de análise dos dados.	51
Figura 13: Tela com os comparadores entre as variáveis.....	52
Figura 14: Tela de monitoramento do gerador 91.	55
Figura 15: Gráfico de com o ranque dos geradores para o cenário 1.	57
Figura 16: Gráfico de com o ranque dos geradores para o cenário 2.	59
Figura 17: Gráfico de com o ranque dos geradores para o cenário 3.	61

Índice de Tabelas

Tabela 1: Composição da geração de energia elétrica brasileira.....	11
Tabela 2: Especificações técnicas do gerador 16V.....	18
Tabela 3: Especificações técnicas do gerador 12V.	18
Tabela 4: Tempos admitidos para sincronismo e potência máxima em função da tecnologia empregada.	20
Tabela 5: Escala Fundamental de Saaty.	24
Tabela 6: Exemplo de matriz de comparação para o consumo de bebida nos Estados Unidos.....	25
Tabela 7: Tabela de valores para RI.	26
Tabela 8: Matriz de decisões para os critérios.....	29
Tabela 9: Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 1.	29
Tabela 10: Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 2.	29
Tabela 11: Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 3.	30
Tabela 12 Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 4.	30
Tabela 13: Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 5.	30
Tabela 14: Matriz com a composição final de auto vetores.	31
Tabela 15: Matriz intermediária para avaliação final.....	31
Tabela 16: Vetor de pesos final.	31
Tabela 17: Tabela com resultados do AHP e ranqueamento do Cenário 1.....	56
Tabela 18: Tabela com grau de inconsistência e ranqueamento do Cenário 1.....	57
Tabela 19: Tabela com resultados do AHP e ranqueamento do Cenário 2.....	58
Tabela 20: Tabela com grau de inconsistência e ranqueamento do Cenário 2.	58
Tabela 21: Tabela com resultados do AHP e ranqueamento do Cenário 3.....	60
Tabela 22: Tabela com grau de inconsistência e ranqueamento do Cenário 3.....	60

Lista de Símbolos

n	Dimensão de uma matriz de julgamentos
a_{ij}	Elemento de uma matriz na posição ij
CR	Proporção de consistência
CI	Índice de consistência da matriz de julgamentos
RI	Índice de consistência de uma matriz aleatória
λ_{\max}	Autovalor máximo
c	Constante Aleatória
A	Matriz de dimensões $n \times n$
v	Auto Vetor de A correspondente a λ_{\max}
In	Corrente da fase n . n sendo A, B ou C
A1	Temperatura do cilindro A1
A2	Temperatura do cilindro A2
A3	Temperatura do cilindro A3
A4	Temperatura do cilindro A4
A5	Temperatura do cilindro A5
A6	Temperatura do cilindro A6
A7	Temperatura do cilindro A7
A8	Temperatura do cilindro A8
B1	Temperatura do cilindro B1
B2	Temperatura do cilindro B2
B3	Temperatura do cilindro B3
B4	Temperatura do cilindro B4
B5	Temperatura do cilindro B5
B6	Temperatura do cilindro B6
B7	Temperatura do cilindro B7
B8	Temperatura do cilindro B8

Lista de Siglas e Abreviações

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Engenharia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Internacional
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
CANBUS	<i>Controller Area Network Bus</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
SQL	<i>Structured Query Language</i>
E3TimeStamp	Horário da captura dos dados
FP	Pressão do combustível
kW	Quilowatt
kVA	Quilivoltampere gerado
kVAR	Quilovoltampere reativo
FREQ	Frequência de operação
BATT	Nível de tensão na bateria
ICT	Temperatura do líquido de arrefecimento
ICP	Pressão do líquido de arrefecimento
FT	Temperatura do combustível
CT	Temperatura do líquido de arrefecimento
CP	Pressão do líquido de arrefecimento
fp	Fator de Potência
g/kWh	Gramas por Quilowatt hora
CVU	Custo Variável Unitário

Resumo

Manter os geradores de plantas termoelétricas em um bom estado de operação pode ser uma tarefa deveras complicada porque, na grande maioria dos casos, utiliza-se um grande número de máquinas, cada uma delas gerando uma quantidade considerável de dados para serem monitorados. Além disso, soma-se o fato de algumas usinas termoelétricas possuírem contratos com a ANEEL, nos quais as mesmas deverão despachar energia de forma não programada pelo ONS. A categoria e o tipo de unidade geradora também são importantes, pois, espera-se que o tempo para sincronismo da primeira unidade e o tempo para atingir a potência máxima da central geradora seja de 30 minutos. Este período de tempo é relativamente baixo quando há um grande número de motores a serem partidos. Neste sentido, aplicar uma ferramenta inteligente capaz de mostrar o estado atual de cada motor, agregando eficiência para a partida e para a geração é impreterível.

Nesta dissertação, apresenta-se o desenvolvimento de um sistema inteligente para controle e monitoramento de malha de potência para usinas termoelétricas, que também inclui a elaboração de uma nova proposta para o método de análise hierárquica, que irá acelerar o processo de ranqueamento. O sistema mostrou-se capaz de monitorar uma extensa gama de variáveis provenientes dos geradores através de sensores. Outras funcionalidades estão em prover alertas, montar um banco de dados com as informações mais relevantes, implementar um supervisório capaz de exibir todas as informações exigidas pelo operador, mas também desenvolver um programa capaz de realizar análises ranqueadas dos geradores baseado nos dados coletados.

O escopo da dissertação aborda também a escolha dos sensores que serão instalados e dos dispositivos necessários para montar uma infraestrutura robusta para a transmissão de dados que atenda todos as funcionalidades requeridas.

Abstract

To keep the power generators in a good state of operation might be a daunting task, because it will probably involve a considerable number of generators and each one of them having a great number of variables to be monitored and processed. Besides that, can be added the fact that some thermo electrical power plants operate in a regime in which they have to dispatch power in a non-scheduled routine, when demanded by ONS. The class and the type of the power generator units are important, because, it's expected that the synchronization time of the first unit and the operating time at full power should be no more than 30 minutes. Which is relatively low, when there are a great number of generators. Following these thoughts, it is imperative having a smart tool that is capable of showing the actual state of each motor, furthermore will assist it in having a more efficient start and power generation.

It was presented in this dissertation the development of a smart control and monitoring system for thermoelectric power plants, that also includes the elaboration of a modification in the Analytic Hierarchic Process that it will the process faster. This tool will be capable of investigating wide array of variables that are being originated from the generators. Moreover, will provide alerts, create a database with all the most relevant information, implement a supervisory capable of showing all the data needed by who is operating the machine and for last, develop a software that it analyzes all of the collected data and rank all the generators.

The scope of this work will approach the selection of the sensor. It will compose the data collection part of the system, the part needed to assemble a robust data transmission infrastructure, study and select mathematical tools. Then, these all structure will allow the ranking of all the generators and give the possibility to the operator, which can modify the evaluation profiles and to validate the whole system.

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A matriz de geração de energia elétrica brasileira é em grande parte composta por hidrelétricas, como pode ser visto na Tabela 1. Já a soma das termoeletricas chega a 14,5% do total de geração do Brasil, sendo que desses 14,5%, somente 2,5% são termoeletricas com fontes primárias de energia a óleo ou diesel.

Tabela 1- Composição da geração de energia elétrica brasileira.

Tipos de geração de acordo com o tipo de fonte	Porcentagem de participação na geração
Hidrelétrica	64,0%
Termoeletrica - Gás	9,0%
Eólica	10,7%
Termoeletrica – Óleo e Diesel	2,5%
Biomassa	8,3%
Termoeletrica - Carvão	1,8%
Solar	2,2%
Termoeletrica - Nuclear	1,2%
Outras	0,4%

Fonte: ONS,2021

Devido a essa estrutura do sistema elétrico, fortemente apoiada na geração de energia proveniente das hidrelétricas, parte do parque termelétrico pode permanecer inativado por grandes períodos de tempo, caso haja condições pluviométricas favoráveis (FONSECA et al, 2018). Mas caso ocorra um período prolongado de seca, essas mesmas termoeletricas podem operar durante longos períodos de tempo, suprindo parte da demanda que não será atendida pelo resto da matriz energética. Esta característica de funcionamento, as torna um componente importante para garantir a segurança e estabilidade do sistema elétrico brasileiro. Consequentemente, o funcionamento das usinas termoeletricas exige alto nível de robustez e confiabilidade para que possam ser

acionadas fora da ordem de mérito. Dados recentes do ONS (ONS, 2021) mostram que durante o dia 17 de janeiro de 2021, devido à manutenção, um grupo de usinas termoelétricas com capacidade total de 3118 MW só conseguiria entregar 1643 MW, ou seja, 52,7% da capacidade total das mesmas, caso houvesse a necessidade. Demonstrando a imprescindibilidade de se possuir uma rede de monitoramento e controle nas centrais geradoras para que o processo de manutenção seja o mais eficiente possível.

Além dos pontos mencionados acima, o ONS requer uma faixa de tempo máxima para que a unidade esteja em sincronia com o sistema e na capacidade de produção máxima, esta exigência está relacionada diretamente com a categoria da unidade geradora. Para suprir esta necessidade, também é interessante recorrer a um sistema de monitoramento das variáveis provenientes das unidades geradoras, para que o despacho de carga seja o mais perto do ideal possível e dentro das regras impostas.

1.2. Justificativa

Devido às características de operação mencionadas anteriormente, torna-se imperativo que essas unidades geradoras consigam manter seus geradores em um estado de condição satisfatório. Assim, podem ser acionados a qualquer momento e quando acionados, podem operar nas melhores condições possíveis.

A implantação de um sistema de monitoramento e sensoriamento se torna quase inevitável. Entretanto, a complexidade desta tarefa está em incorporar toda a estrutura necessária nos moldes de uma termoelétrica em funcionamento. Alguns pontos de dificuldade são:

- Como incorporar novos sensores aos já existentes na planta;
- Implantar uma rede de transmissão de dados robusta suficiente para conseguir operar sobre condições adversas;
- Decidir a melhor estratégia de classificação dos geradores para que representem os estados dos mesmos com a maior acurácia possível;
- Definir formas para exibir a informação referente à classificação dos geradores, de uma forma que seja eficiente para a operação da planta.

Os pontos mencionados serviram de justificativa e motivação para o estudo apresentado nos próximos capítulos.

1.3. Objetivos e Contribuições

Esta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema inteligente capaz de monitorar, gerenciar e analisar os dados provenientes de unidades geradoras. A partir das informações obtidas, produzir um ranqueamento das unidades geradoras e relatórios sobre as variáveis pertinentes ao funcionamento do motor, além disso, indicar quais motores tiveram a maior variação em seu estado. O sistema desenvolvido contribui com o funcionamento de termoelétricas, respeitando as restrições impostas pela ANEEL e ONS.

Escolheu-se técnicas matemáticas adequadas, visando à criação de um algoritmo que é responsável por ranquear os geradores de maneira eficiente.

Esta dissertação contribuiu com a operação de uma usina termoelétrica de geração de energia elétrica por meio do desenvolvimento de um sistema inteligente. Este é capaz de dar suporte a uma política de manutenção dos geradores, dando informações sobre o estado de cada unidade de geração.

1.4. Organização da Dissertação

Neste capítulo, são apresentados o objetivo e a justificativa do presente trabalho. Contextualiza o trabalho e traz maior entendimento do porquê da utilização e importância dos sistemas inteligentes para o gerenciamento de usinas para geração de energia elétrica.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos fundamentais para o entendimento do funcionamento de usina termoelétrica, apresentando a função dos despachos e agentes.

O Capítulo 3 apresenta a ferramenta matemática AHP (*Analytic Hierarchy Process*), que foi utilizada no trabalho.

O Capítulo 4 esclarece os conceitos envolvidos na implementação da ferramenta matemática AHP modificada que foi desenvolvida para ser utilizada em tempo real foi aplicada para o cálculo do ranking das unidades geradoras. A linguagem de programação utilizada para manipulação de todas as informações relevantes foi Python.

O Capítulo 5 descreve o desenvolvimento pertinente das redes de transmissão de dados e quais são os dispositivos que a compõem. Neste capítulo também é apresentado o sistema de supervisão e armazenamento de dados.

O Capítulo 6 apresenta e avalia os resultados do sistema inteligente.

O Capítulo 7 contém a conclusão da dissertação, mas também apresenta propostas e possibilidades para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. OPERAÇÃO DE TERMOELÉTRICA NO SI

A usina termoeletrica pode ser definida como uma planta quimica que consegue gerar energia a partir de uma fonte de calor, seja ela proveniente da queima de um combustivel fossil ou outras fontes não tradicionais, tendo como exemplo a fissão nuclear. Este tipo de usina é utilizada de maneira estratégica no Brasil, por sua capacidade de geração constante, independente de níveis pluviométricos, pois funcionam como um sistema complementar à matriz energética das hidrelétricas, sendo acionadas quando há necessidade.

Entretanto, para os órgãos responsáveis pelo controle e programação dos despachos de energia da rede elétrica brasileira, esta definição não é suficiente para categorizar todos os tipos de termoeletricas e atribuir suas funções e responsabilidades dentro do SIN. Os próximos parágrafos explicam todas as modalidades de operação definidas para esse tipo de usina. Além disso, é discutido o detalhamento referente às limitações e responsabilidades que algumas termoeletricas possuem durante a geração, como também os benefícios provenientes da inserção de um programa de supervisão e análise das unidades geradoras instaladas.

2.1. Modalidades de Operação das usinas

Existem três categorias diferentes para a operação das usinas termoeletricas perante ao ONS. Cada modalidade possui responsabilidades e funcionamento intrínsecos, pois são diferentes entre si. É extremamente importante entender essas modalidades, porque impactam diretamente no nível de controle e eficiência da planta. Para melhor compreensão deste trabalho, foram dispostos maior detalhamento sobre as modalidades de operação de termoeletricas nos parágrafos seguintes.

A definição da modalidade da usina é feita pelo ONS (ONS, 2019). Ela também realiza esta classificação a partir de análises elétricas, hidrológicas e energéticas em conjunto com os processos de planejamento e programação da operação eletroenergética, pré-operação, controle em tempo real da usina e a pós-operação. A ANEEL pode ser consultada durante o processo.

As usinas podem ser definidas em três tipos diferentes de modalidade: Tipo I, Tipo II e Tipo III.

2.1.1. Modalidade do Tipo I

As usinas do Tipo I podem ser divididas em duas categorias. A primeira categoria pode ser definida como “Usinas conectadas na rede básica independente da potência líquida que é injetada no SIN e da natureza da fonte primária e que afetem a operação eletroenergética” (ONS, Submódulo 26.2, 2019, P. 4). Os impactos na segurança da rede de operação de acordo com o controle de tensão, controle de carregamento nos equipamentos e limites de transmissão do sistema devem ser considerados como critérios elétricos.

A segunda categoria para o Tipo I são as de usinas que estão fora da rede básica e nas quais as potências máximas líquidas injetadas no SIN serão utilizadas para aumentar a segurança da rede em caso de algum tipo problema operacional. A análise para as usinas conectadas fora da rede básica será específica para cada caso. As plantas com capacidade máxima de potência que são capazes de provocar variações no carregamento, transformação de fronteira superior a 10% da potência nominal, devem ser consideradas plantas referências para avaliação.

As usinas que se encontram na modalidade do Tipo I devem atender a alguns Procedimentos de Rede, que são:

- Participar de processos que contribuam para a ampliação, planejamento e programação da operação, normatização, pré-operação, operação em tempo real e pós-operação;
- Programa de geração estabelecida de forma coordenada pelo ONS em períodos de dias, semanas e meses, denominada de Programação Centralizada;
- Despacho da geração no tempo real, coordenado, estabelecido, supervisionado e controlado pelo ONS, denominada de Despacho centralizado.

2.1.2. Modalidade do Tipo II

Na modalidade do Tipo II, se encaixam as usinas que podem ou não estar conectadas à rede básica e que não causam algum tipo de impacto na segurança elétrica da rede de operação. Entretanto, elas afetam outros processos, sendo necessário que as mesmas usinas participem do planejamento, programação, operação em tempo real, pré-operação e pós-operação.

Dentro da modalidade do Tipo II, existem outros três subgrupos, sendo eles, o subgrupo A, B e C. O subgrupo A é composto por usinas térmicas com o CVU declarado e que são despachadas por ordem de mérito. As usinas hidráulicas com potências maiores do que 30 MW que não causam impacto na rede de operação também fazem parte deste subgrupo. As usinas pertencentes a esta classificação devem participar dos processos já mencionados anteriormente como ampliações e planejamento, da Programação Centralizada e Despacho Centralizado.

O subgrupo B será formado pelos seguintes tipos de usinas:

- Usinas onde o reservatório impacta na geração das usinas do Tipo I;
- Usinas com características da fonte primária de geração de energia que não podem atender ao despacho centralizado, como exemplo da biomassa, eólica e fotovoltaica;
- Usinas que demandam a transmissão de informações ao ONS. Com isso, elas são passíveis de representação individual no planejamento e programação da operação, mas também, eventualmente da operação em tempo real.

As usinas dentro do subgrupo B da modalidade do Tipo II tem como obrigação participar da ampliação e reforço, planejamento e programação da operação. Além disso, precisam informar seu despacho programado para o ONS, para que conste na programação centralizada e estabelecida pelo Operador Nacional. Apesar do ONS não coordenar e possuir rotineiramente a programação e despacho deste grupo, em caráter excepcional, o mesmo órgão pode centralizar a operação das usinas pertencentes ao grupo, visando atender as condições específicas.

O subgrupo C da modalidade do tipo II é formado pelo conjunto de usinas que individualmente não impactam a operação do SIN. Entretanto, quando são analisados em conjunto para as usinas conectadas em um mesmo ponto na rede, totalizam uma potência significativa que será injetada na rede. As mesmas precisam atender a um conjunto de dois procedimentos:

- Participar dos processos de ampliações e reforços, planejamento e programação da operação;
- Fornecer ao ONS sua geração programada para que seja considerada na programação da operação.

2.1.3. Modalidade do Tipo III

As usinas enquadradas na modalidade Tipo III estão fora da rede básica e não causam impacto no SIN e nos empreendimentos de autoprodução, os quais estão conectados na rede básica e a demanda de energia é maior que a produção. Devido às características inerentes à modalidade, estas usinas não possuem conexão com a ONS. Outro ponto a ser ressaltado, é o processo de consolidação de carga e programação diária. Estes dois processos devem ser informados pela distribuidora, constatando a conexão com o empreendimento.

2.2. Especificações dos Geradores

Antes de descrever mais sobre outras regras necessárias às operações das termoelétricas, será necessário descrever sobre os geradores utilizados na planta que serviu como estudo de caso para esta dissertação. As características dos motores influenciam no tempo de sincronia com o sistema e tempo para atingir a potência máxima. Os dois modelos de geradores usados na planta são o MTU 12V4000G43 (MTU SOLUTIONS, 2019) e o MTU 16V4000 G43 (MTU SOLUTIONS, 2019), com 12 e 16 cilindros, respectivamente. As especificações nominais para ambos os modelos se encontram-se nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Especificações técnicas do gerador 16V.

MTU 16V4000G43					
Tensão [V]	Fases	Frequência [Hz]	Potência [kVA]	Corrente [A]	fp
380	3	60	2588	3932	0,8

Fonte: MTU Solutions

Tabela 3 - Especificações técnicas do gerador 12V.

MTU 12V4000G43					
Tensão [V]	Fases	Frequência [Hz]	Potência [kVA]	Corrente [A]	fp
380	3	60	1938	2944	0,8

Fonte: MTU Solutions

Ambos os geradores são movidos a óleo diesel e possuem como característica o baixo consumo de combustível, 200 g/kWh para o de 16 cilindros e 199 g/kWh para o de 12 cilindros, ambos a 75% de carga. As versões de motor gerador possuem características de fabricação como as de um filtro, com estágio para a injeção de ar, sistemas de dreno de óleo de lubrificação e funcionamento com curto circuito de 300% por 10 segundos. Ainda, possuem um painel de controle com a capacidade de configurar alarmes, mostrar medições de algumas variáveis e gravar eventos.

Ter conhecimento dessas especificações é importante, porque às mesmas darão a dimensão das variáveis que serão monitoradas e processadas pelo programa de controle. Também será importante porque a partir destes dados o ONS irá selecionar alguns requerimentos de funcionamento para a planta, como tempo de sincronia da primeira unidade geradora.

2.3. Apuração de indisponibilidades programadas e forçadas

Existe uma restrição de tempo para a sincronização e obtenção da potência máxima que deve ser despachada pelo ONS (ONS, 2010). A usina termoelétrica utilizada no estudo de caso, tem uma capacidade total de geração de 170MW com motores baseados no ciclo diesel. Com isso, a usina utilizada é encontrada na linha 1 da Tabela 4. Esta classificação refere-se às usinas com geradores baseados no ciclo diesel com potência total maior ou igual a 2,0MW. As restrições devem ser respeitadas de acordo com a modalidade de cada usina. No caso da termoelétrica em estudo, o tempo de sincronização com a primeira unidade geradora somado ao período de tempo que a central atingirá a potência máxima, deve ser 30 minutos.

Tabela 4 - Tempos admitidos para sincronismo e potência máxima em função da tecnologia empregada.

Tecnologia Empregada	Tempo para o sincronismo da primeira unidade [minutos]	Tempo para potência máxima da central geradora [minutos]
1- Ciclo diesel com potência de unidade geradora menor ou igual a 2,0MW	30	30
2- Ciclo diesel com potência de unidade geradora maior ou igual a 2,0MW	60	75
3-Turbina a gás aeroderivada	40	40
4- Turbina a gás heavy-duty	60	60
5- Turbina a vapor (ciclo rankine)	600	300
6- Turbina a gás operando em ciclo combinado com turbina a vapor	60	750

Fonte: ONS, Submódulo 10.13, 2016.

Como apresentado na Tabela 4, a unidade geradora terá um período de 30 minutos em caso de geração não centralizada e programada pelo ONS, visando ao sincronismo com a primeira unidade e o alcance da potência máxima da planta. Estas informações trazem uma dimensão da necessidade de possuir um programa de monitoramento capaz de auxiliar o operador com dados atuais sobre os estados das unidades geradoras, pois quando houver a necessidade de operação, esta ocorrerá da maneira mais eficiente possível.

Capítulo 3

3. AHP

A implementação de uma estratégia computacional de controle e análise necessita estabelecer uma base matemática robusta que cumpra com as demandas do projeto. A estratégia deve ranquear e diagnosticar os geradores utilizando as variáveis calculadas a partir das informações obtidas pela rede de sensoriamento, além de permitir de que este diagnóstico possa ser realizado utilizando diferentes tipos de perfis de julgamento, de acordo com a escolha do usuário. A existência de diversas variáveis, de diferentes naturezas dentro do motor, possibilita a criação de diversos perfis de análise, um deles é mais focado no consumo da unidade geradora, outro é mais direcionado à temperatura do líquido de arrefecimento ou, até mesmo, às horas de operação, balanceando a importância de cada parâmetro conforme o perfil selecionado. Então, procurou-se uma ferramenta matemática capaz de tornar essa comparação não analítica em grandezas relevantes e úteis ao processo de ranqueamento das unidades geradoras. O Método de Análise Hierárquica, ou em inglês *Analytic Hierarchy Process*, foi selecionado por prover uma solução ao problema proposto. Explica-se, no decorrer deste capítulo, o método matemático mencionado com mais detalhes. Ainda, explora-se os tópicos de fundamentação, os elementos que compõem a estratégia adotada, as métricas para julgar o resultado e exemplos.

3.1. Fundamentação

O *Analytic Hierarchy Process*, podendo ser abreviado como AHP (Saaty, 2004) é um método natural de comparação e tomada de decisão para elementos. Consiste em tentativas de tornar analítico aquilo que à primeira vista pode não ser quantificável. Esta característica colabora com a avaliação dos objetos, pois, talvez, eles não possuam uma escala ou referência quantitativa. De acordo com Saaty (2004), quando o subconsciente precisa classificar uma grande quantidade de elementos, em situações complexas ou não, o processo natural é intuitivo e a mente tenta agregar a informação em grupos, baseando-se nas propriedades comuns que identificam os elementos. Os filtros de classificação são muito importantes para a identificação de propriedades intrínsecas a cada grupo. Deste modo, a escolha entre o melhor ou pior elemento inserido nestes grupos está baseada em

séries de comparações conscientes ou inconscientes. Com isso, são gerados elementos pertencentes a grupos com maiores prioridades de escolha, até atingir um único elemento máximo.

Este processo é de suma importância para a sobrevivência dos seres vivos. O modelamento dessa função cerebral permite uma repetição do processo, em diferentes tipos de cenários, agora, de maneira analítica.

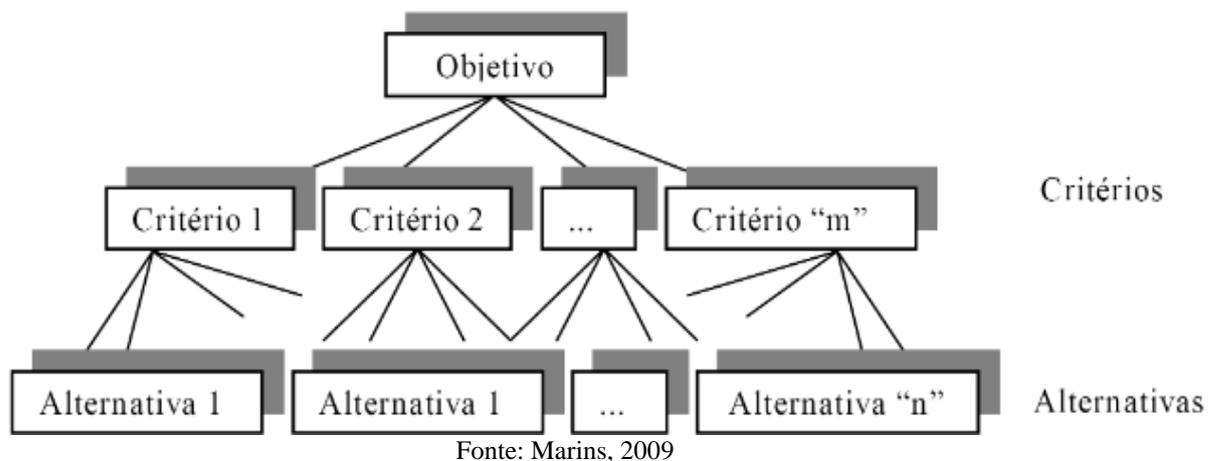
O método AHP após dividir o problema em níveis hierárquicos, determina de forma clara e por meio da síntese dos valores dos agentes de decisão, uma medida global para cada uma das alternativas, priorizando-as ou classificando-as ao finalizar o método.

3.1.1. Elementos

Para melhor explicar o processo do AHP, alguns elementos que compõem a ferramenta matemática devem ser melhor explicado, segue:

- **Alternativas:** são as opções possíveis para resolver ou atingir o objetivo definido no topo da estrutura hierárquica. Como dito no parágrafo anterior, a alternativa que se encaixar em mais critérios, terá a maior nota e possivelmente será escolhida para resolver o objetivo.
- **Homogeneidade:** os critérios de um determinado nível hierárquico devem apresentar o mesmo grau de importância relativa dentro do seu nível, isto é, no momento de elaborar a hierarquia, é necessário ter cuidado para não aplicar critérios de grau inferior em nível superior. Atribuir status superior a algum critério poderia causar uma distorção nos resultados por causa de uma possível supervalorização.
- **Não-redundância:** uma hierarquia, geralmente linear, é uma estrutura que representa a dependência dos diversos níveis que a compõem de forma sequencial. Para evitar a redundância, assume-se a independência de um determinado nível em relação aos níveis inferiores. Esse tipo de estrutura desenvolve-se do nível mais elevado aos níveis inferiores (visão de cima para baixo), isto é, dos aspectos mais básicos aos mais concretos.

Figura 1 - Estrutura hierárquica genérica do AHP.



Também houve a definição utilizando uma ótica mais acadêmica para os elementos que compõe esse processo de decisão, para que houvesse uma padronização na utilização do algoritmo. Esses elementos são os seguintes (MARINS, 2009):

- **Critérios e subcritérios:** são características, qualidades, outros tipos de classificação que podem ser utilizados para avaliar as alternativas de escolha. Os mesmos podem possuir subcritérios, ramificando as características a serem analisadas. Quanto maior o número de características, maior a complexidade do problema a ser resolvido. Se uma alternativa adere a vários critérios, maior será a sua chance de ser escolhida como a resposta ao objetivo.
- **Hierarquia:** um conjunto de critérios ordenados por ordem de preferência e homogêneos em seus respectivos níveis hierárquicos. A estrutura hierárquica genérica do Processo de Análise Hierárquica está definida na Figura 1.

Outros pontos importantes da fundamentação do AHP são:

- **Comparações Paritárias:** a comparação das alternativas, segundo um certo critério ou propriedade, é feita aos pares, indicando qual alternativa é preferível em relação a outra.

- **Proporção de Consistência:** após as comparações terem sido realizadas pelo usuário, é necessário realizar uma análise de inconsistência das matrizes de resultados, para que se certifique que as comparações possuam uma lógica consistente. Exemplo, caso $A > B$ e $B > C$, $A > C$ conseqüentemente.
- **Escala Fundamental de Saaty:** a cada par de alternativas, para um certo critério, associa-se um valor em uma escala numérica de números positivos e inteiros. A comparação par a par é realizada utilizando uma escala própria, que varia de 1 a 9, denominada Escala Fundamental, como mostrado na Tabela 5

Tabela 5 - Escala Fundamental de Saaty

Valor	Grau de Importância
1	Igual importância
3	Importância pequena de uma sobre a outra
5	Importância grande ou essencial
7	Importância muito grande ou demonstrada
9	Importância absoluta
2,4,6,8	Valores Intermediários

Fonte: Saaty, 2004

As comparações paritárias serão exploradas de maneira mais minuciosa posteriormente. As matrizes de julgamentos são compostas somente por números da Escala Fundamental de Saaty.

Figura 2 - Matriz de julgamentos genérica

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Fonte: Marins, 2009

O elemento “ a_{ij} ” representa um número na escala de Saaty. A posição inversa a “ a_{ij} ” será sempre o seu recíproco “ $1/a_{ij}$ ”. É possível utilizar o exemplo abaixo que se refere ao julgamento do consumo estimado dos tipos de bebidas no território dos Estados Unidos.

O processo de comparação par a par entre os critérios será chamado de Priorização, diferente do processo de comparação paritário entre as alternativas que será denominado de avaliação e ambos terão como decorrência a formação de uma matriz de julgamento. E ao se calcular o auto vetor correspondente ao maior auto valor da matriz de julgamentos e dividir todos os elementos do auto vetor pela soma dos mesmo, o resultado será o vetor de prioridades, que contém os pesos normalizados de cada alternativa ou critério.

Tabela 6 - Exemplo de matriz de comparação para o consumo de bebida nos Estados Unidos

Consumo de bebidas nos Estados Unidos	Exemplo de estimação utilizando julgamentos						
	Café	Vinho	Chá	Cerveja	Refrigerante	Leite	Água
Café	1	9	5	2	1	1	1/2
Vinho	1/9	1	1/3	1/9	1/9	1/9	1/9
Chá	1/5	2	1	1/3	1/4	1/3	1/9
Cerveja	1/2	9	3	1	1/2	1	1/3
Refrigerante	1	9	4	2	1	2	1/2
Leite	1	9	3	1	1/2	1	1/3
Água	2	9	9	3	2	3	1

Fonte: Saaty, 2004

O processo utilizado pelo método AHP pode ser dividido nas seguintes etapas: estruturação hierárquica do problema de decisão e a execução de um algoritmo matemático. Esta última, está direcionada a decidir, dentro das alternativas, qual tem a

maior prioridade de escolha. O responsável pela decisão, ou o grupo designado por ele, deverá efetuar a estruturação do problema em estudo. Com isso, a combinação dos critérios é realizada de acordo com os mais diferentes níveis hierárquicos necessários, visando a obtenção de uma representação do problema.

Determinam-se também, as alternativas pertinentes a situação, que serão estudadas sob a ótica de cada critério.

3.2. Proporção de consistência

Durante a fase de Avaliação e Priorização do AHP, realiza-se uma série de comparações par a par entre os critérios e as alternativas. Ao terminar a contraposição destes elementos, avalia-se a proporção de consistência. Caso esteja alta, implica em uma resposta que pode ser invalidada, já que as respostas terão um alto grau de incoerência. O método recomenda uma proporção de inconsistência de até 10% para as matrizes de julgamentos, tanto a dos critérios quanto a das alternativas. Normalmente, uma revisão das comparações leva à identificação de erros nos valores atribuídos, assim diminuindo o valor do grau inconsistência. Porém, em alguns casos, devido ao grande número de comparações, localizar o erro pode ser uma tarefa de extrema dificuldade, levando a inferência de que os valores escolhidos, quando analisados em conjunto, são inconsistentes.

A equação (1) determina a proporção de consistência da Matriz em estudo, o qual pode ser determinado utilizando CI e RI, o último pode ser obtido utilizando a Tabela 7.

$$CR = CI/RI \quad (1)$$

Tabela 7 - Tabela de valores para RI.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty, 2004

Na equação (2), usa-se um termo denominado de λ_{\max} , que é o maior auto valor da matriz de julgamentos. Esta variável pode ser calculada seguindo as seguintes etapas:

- Multiplica-se o vetor de prioridades pela matriz de julgamentos;
- Realiza-se uma divisão elemento por elemento do vetor resultante da etapa anterior pelo vetor de prioridades;
- Soma-se todos os elementos do vetor resultante e divide-o pelo número de elementos do vetor para obter lambda máximo.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

Após determinar o coeficiente lambda, aplica-se a equação (2) e determina-se CI. Depois, volta-se para a primeira equação mostrada nesta seção da dissertação para determinar a Proporção de Inconsistência.

3.3. Método das potências

Após a etapa anterior do algoritmo, obtém-se um parâmetro da consistência do resultado final do método, se estiver dentro dos limites impostos, pode se dar procedência as etapas seguintes do AHP. Para determinar quais alternativas e quais critérios tem o maior peso, ou seja, calcular o vetor de prioridades, será preciso utilizar de uma ferramenta matemática chamada de Métodos das Potências. Esta, emprega conceitos de geometria analítica e cálculo numérico para determinar o auto vetor dominante de uma matriz.

O vetor de prioridades pode ser considerado auto vetor dominante dividido pela soma de seus elementos (SAATY, 2010), porque ele permanece invariante ao ser multiplicado por uma constante “c” qualquer, e também não deve sofrer variações ao passar por uma composição hierárquica com a própria matriz de julgamentos. Essa ideia pode ser composta com a equação (3), que é a definição de auto vetor.

$$Av = cv$$

(3)

Para resolver o problema apresentado na equação 3 e determinar o auto vetor dominante de uma matriz deve se seguir um simples algoritmo iterativo. Inicializa-se a variável v_k com valores aleatórios, mas normalmente cada elemento é preenchido com o valor “1/n”. Como indicado na equação (4) para determinar a próxima iteração do auto vetor que se deseja calcular, multiplica-se a matriz “A” por v_k e divide o resultado dessa multiplicação pelo módulo da mesma. Repete-se o processo até que os valores de erro estejam dentro de um limiar pré-determinado pelo operador ou que tenha ocorrido valor limite de iterações.

$$v_{k+1} = (A * v_k) / \|A * v_k\|$$

(4)

3.4. Exemplo: Seleção de critérios genéricos utilizando o AHP

Nesta seção da dissertação, será tratado um exemplo de como realizar a escolha de uma alternativa qualquer utilizando o método de análise hierárquica. Serão utilizados 5 critérios e 4 alternativas para demonstrar o método. Os critérios e alternativas serão denominados de acordo:

- C1 – Critério 1
- C2 – Critério 2
- C3 – Critério 3
- C4 – Critério 4
- C5 – Critério 5
- A1 – Alternativa 1
- A2 – Alternativa 2

- A3 – Alternativa 3
- A4 – Alternativa 4

O primeiro passo será realizar as comparações paritárias entre os critérios, montar a matriz de decisões e a partir dela calcular o vetor de prioridades para o critério. A Tabela 8 contém os valores das comparações paritárias e vetor de prioridades que foi calculado utilizando o método das potências e depois normalizando o resultado.

Tabela 8 - Matriz de decisões para os critérios

	C1	C2	C3	C4	C5	Prioridades
C1	1	2	1/4	1/5	3	0,113
C2	1/2	1	1/5	1/7	2	0,070
C3	4	5	1	1/2	5	0,310
C4	5	7	2	1	4	0,449
C5	1/3	1/2	1/5	1/4	1	0,058

Fonte: Autoria Própria

Utilizando os passos para o cálculo de proporção de consistência este par de matriz de decisões e vetor de prioridades e o valor de RI para dimensão 5, a proporção de consistência será de 5,7%. Este processo irá se repetir para alternativas, sendo julgadas sobre cada critério, também serão montadas as matrizes de decisões e seus respectivos vetores de prioridades, como indicado nas Tabelas 9, 10, 11,12 e 13.

Tabela 9 - Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 1

C1	A1	A2	A3	A4	Prioridades
A1	1	1/2	1/7	5	0,120
A2	2	1	1/4	7	0,208
A3	7	4	1	9	0,634
A4	1/7	1/7	1/9	1	0,037

Fonte: Autoria Própria

Tabela 10 - Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 2

C2	A1	A2	A3	A4	Prioridades
A1	1	1/2	5	3	0,298
A2	2	1	7	5	0,523
A3	1/5	1/7	1	1/3	0,057

A4	1/3	1/5	3	1	0,122
-----------	------------	------------	----------	----------	--------------

Fonte: Autoria Própria

Tabela 11 - Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 3

C3	A1	A2	A3	A4	Prioridades
A1	1	3	2	1/7	0.148
A2	1/3	1	1/3	1/8	0.054
A3	1/2	3	1	1/7	0.105
A4	7	8	7	1	0.693

Fonte: Autoria Própria

Tabela 12 - Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 4

C4	A1	A2	A3	A4	Prioridades
A1	1	1/3	1	3	0,209
A2	3	1	3	4	0,510
A3	1	1/3	1	2	0,186
A4	1/3	1/4	1/2	1	0,095

Fonte: Autoria Própria

Tabela 13 - Matriz de decisões para as alternativas sob o critério 5

C5	A1	A2	A3	A4	Prioridades
A1	1	2	1/2	1	0.2241
A2	1/2	1	1/2	1/2	0.1382
A3	2	2	1	3	0.4311
A4	1	2	1/3	1	0.2066

Fonte: Autoria Própria

A proporção de consistência para a matriz de decisões de referente as alternativas sobre o Critério 1 é 6,1%, sobre o Critério 2 é 2,5%, sobre o Critério 3 é 6,6%, sobre o Critério 4 é 2,3% e sobre o Critério 5 é 4,4%. Após todas as comparações paritárias terem sido realizadas, tanto para as alternativas, quanto para os critérios, uma composição com os vetores de prioridades de todas as matrizes como indicado na Tabela 14. A primeira

linha será do vetor de prioridades dos critérios, e as próximas linhas serão dos vetores de prioridades das alternativas.

Tabela 14 – Matriz com a composição final de auto vetores

	C1	C2	C3	C4	C5
Peso Critério	0,137	0,082	0,329	0,404	0,048
A1	0,169	0,309	0,173	0,238	0,233
A2	0,261	0,488	0,050	0,491	0,129
A3	0,534	0,055	0,131	0,178	0,414
A4	0,037	0,148	0,646	0,093	0,224

Fonte: Autoria Própria

Importante ressaltar que a proporção de consistência para a Tabela 14 ou 15 não serão calculados, porque essa variável mede a consistência das escolhas do usuário e não de uma matriz composta por diversos vetores de prioridades. Para obter a avaliação final das alternativas, multiplica-se elemento por elemento, a primeira linha pelas outras linhas, resultando no exemplo em uma matriz 4 x 4, como na Tabela 15. Depois soma-se todos os elementos de cada linha, resultando em um matriz 4x1, como na Tabela 16.

Tabela 15 – Matriz intermediária para avaliação final

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,023153	0,025338	0,056917	0,096152	0,011184
A2	0,035757	0,040016	0,01645	0,198364	0,006192
A3	0,073158	0,00451	0,043099	0,071912	0,019872
A4	0,005069	0,012136	0,212534	0,037572	0,010752

Fonte: Autoria Própria

Tabela 16 – Vetor de pesos final

	Vetor de Pesos
A1	0,2127
A2	0,2968
A3	0,2126
A4	0,2781

Capítulo 4

4. SISTEMA INTELIGENTE DE RANQUEAMENTO

Tendo em vista um dos objetivos que é ranquear as unidades geradoras, foi desenvolvido um algoritmo capaz de processar os dados disponíveis nos bancos dados, incorporar o método de análise hierárquica, importar e exportar valores históricos, estes últimos estão salvos em planilhas CSV. O algoritmo também deverá retornar os resultados de análises matemáticas para o banco de dados, visando a utilização destes pelo programa do supervisor. Um dos pontos mais importante a ser tratado neste capítulo será uma variação do método AHP que foi desenvolvida para este projeto, que permitiu a implementação em tempo real do sistema inteligente

O objetivo deste capítulo é apresentar melhor o funcionamento do sistema de ranqueamento.

4.1. AHP Modificado

O ranqueamento dos geradores se for realizado utilizando o método AHP tradicional para esta aplicação, terá que processar 10 matrizes 99×99 , 1 matriz 10×10 e uma matriz composta pelos auto vetores das matrizes como demonstrado no exemplo dado no capítulo anterior. Essa quantidade de dados a serem processados irá inviabilizar a utilização do método para aplicações em tempo real, que é o objetivo do projeto. Então, uma variação para o processo de análise hierárquico foi proposto, denominado de AHP Modificado.

Este novo método, consiste em somente utilizar o vetor de prioridades do critério para calcular as notas do geradores, porque diferente do método tradicional, a parte das comparações paritárias entre as alternativas não ocorrerá, devido ao fato das mesmas poderem calculadas, necessitando determinar somente a importância relativa entre os critérios. O cálculo da nota se dará fazendo uma multiplicação matricial entre o vetor de

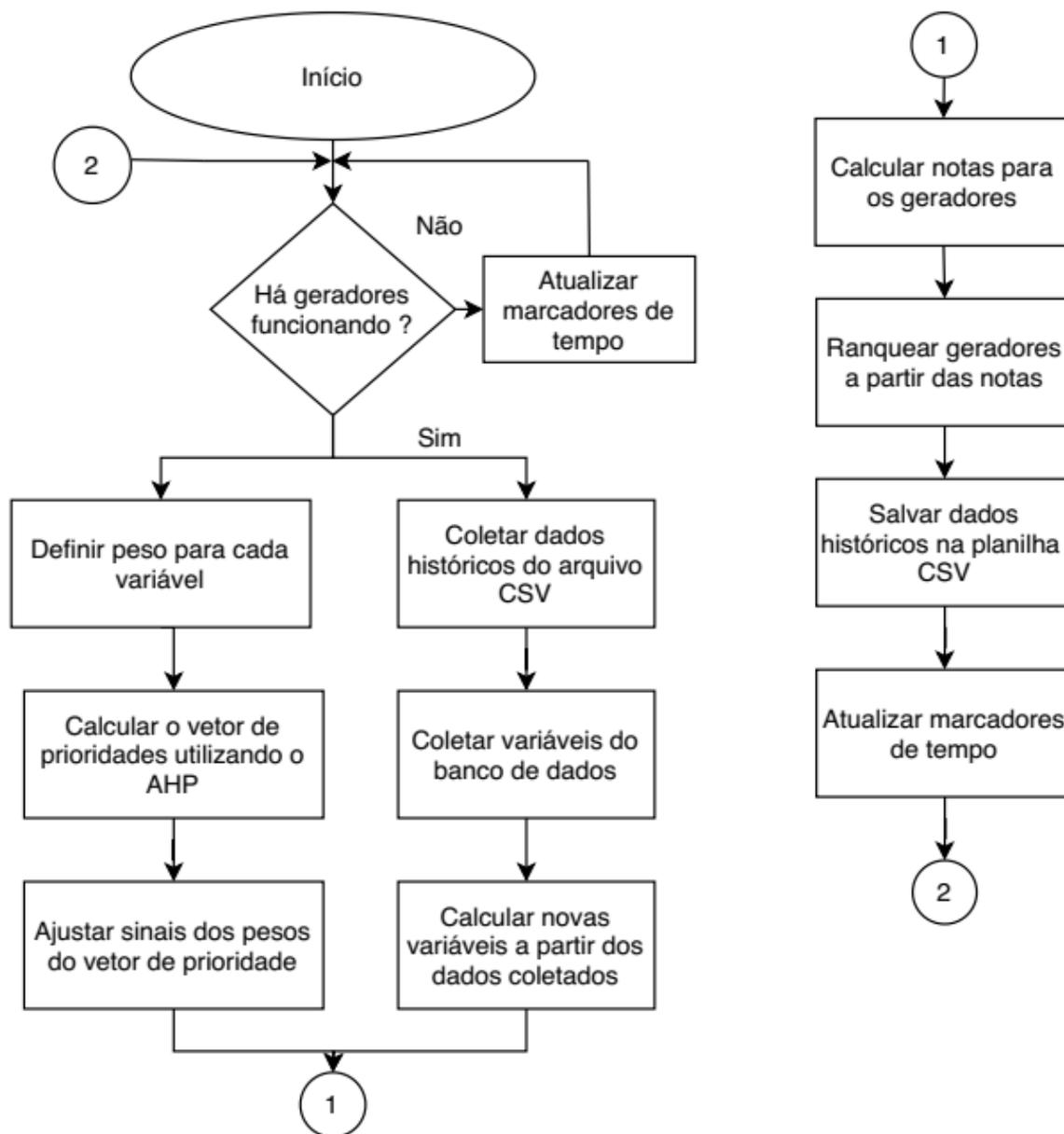
prioridades da matriz de julgamentos dos critérios e uma matriz 99×10 , que conterà para cada gerador 10 variáveis calculadas a partir das informações provenientes dos mesmos. O vetor resultante será de dimensão 99×1 com as notas referentes a cada unidade geradora.

É importante frisar novamente a importância dessa metodologia adotada, porque possibilitará um ranqueamento em tempo real das unidades geradoras.

4.2. Processamento dos dados

Diversas etapas devem ocorrer em uma ordem cronológica para que o cálculo das variáveis de estado de cada gerador aconteça corretamente, de forma cíclica e eficiente. Basicamente, todos os passos necessários se encontram na figura a seguir.

Figura 3 - Fluxograma do processo geral de ranqueamento



Fonte: Autoria própria

Na Figura 6, a primeira etapa do algoritmo de processamento de dados é verificar se tem algum gerador funcionando. Deste modo, soma-se todos os elementos da tabela que possui os indicadores de funcionamento das unidades. Os indicadores são “1” para funcionando e “0” para parado. Se o resultado da soma der diferente de 0, significa que algum gerador está funcionando. Caso contrário, não está ocorrendo nenhuma geração de energia. Com isso, o algoritmo irá somente atualizar os marcadores de tempo das tabelas

para indicar que o programa está funcionando corretamente. Se algum gerador estiver funcionando, uma outra parte do programa será executada.

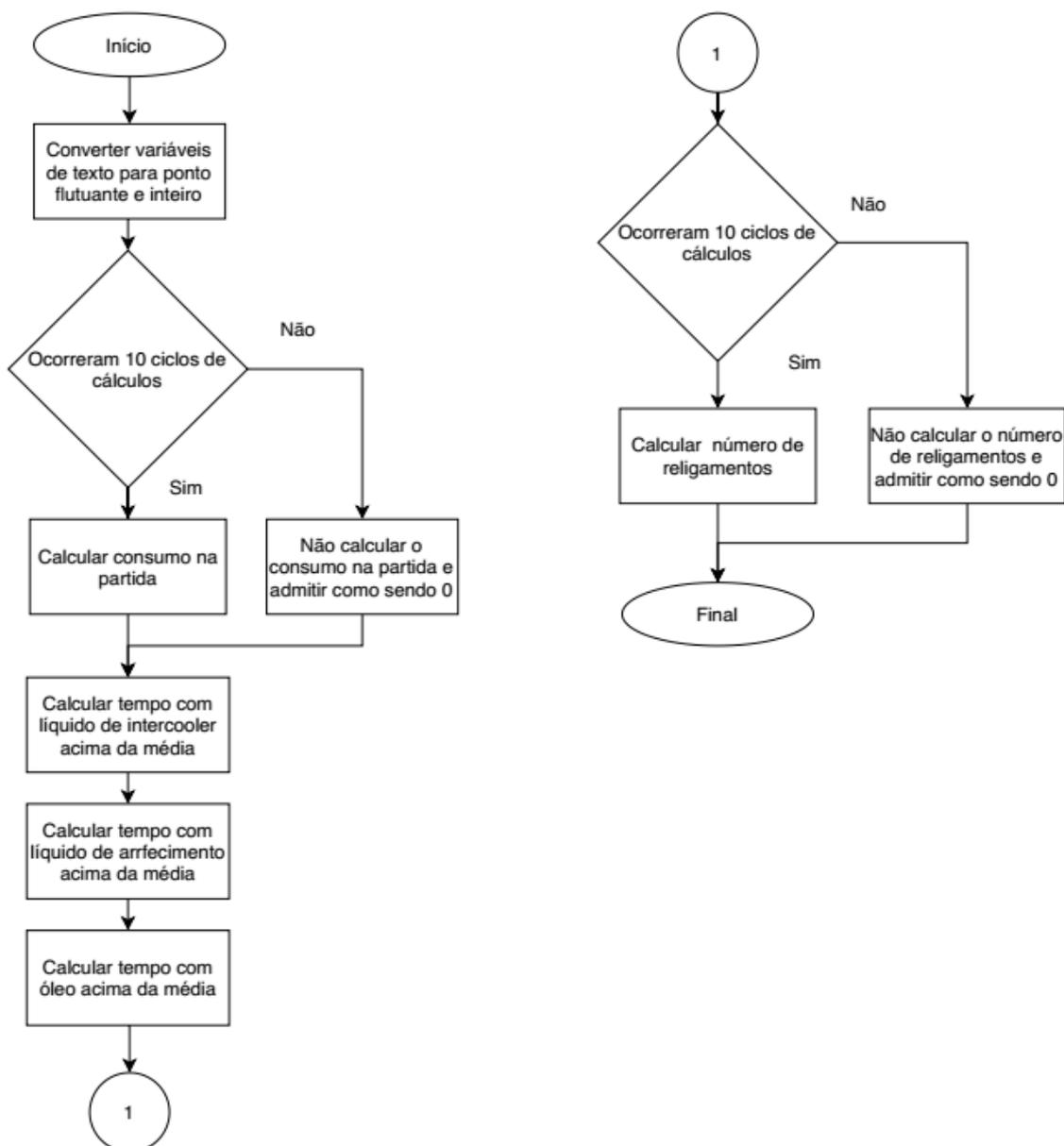
O próximo trecho do programa será executado em paralelo utilizando um recurso de programação denominado thread, que permite a execução de forma simultânea de diversas partes do código. Além do ponto mencionado acima, esta parte do algoritmo é responsável por gerar as variáveis que serão utilizadas para calcular as notas e o vetor de prioridades. Antes de entrar no algoritmo responsável pelo ranqueamento, haverá maior esclarecimento sobre um outro recurso utilizado no programa. Este recurso é um arquivo CSV que foi criado com as informações passadas dos geradores, pois parte do algoritmo de ranqueamento depende desses valores. As variáveis que serão salvas no arquivo CSV são:

- Índice dos geradores;
- Média da temperatura do líquido de arrefecimento;
- Tempo que o líquido de arrefecimento fica acima da média;
- Média da temperatura do líquido do Intercooler;
- Tempo que o líquido do Intercooler fica acima da média;
- Média da temperatura do óleo;
- Tempo que o óleo fica acima da média;
- Número de religamentos;
- Tempo que o gerador ficou com a carga entre 50% e 60%;
- Tempo que o gerador ficou com a carga abaixo de 73% e acima de 60%;
- Tempo que o gerador ficou com a carga entre 100% e 73%;
- Consumo na partida;
- Número de amostras;
- Tempo instantâneo da amostragem.

Atualiza-se as variáveis supracitadas em todo ciclo de processamento de dados. Como estas variáveis são independentes das prioridades advindas do AHP, se houver alteração dos pesos, não haverá modificação dos valores relacionados. Após a explicação do arquivo CSV, que dará suporte ao ranqueamento, é necessário explicar o restante do algoritmo.

Sequencialmente, ocorrerá um ciclo de repetição para processar os dados de cada gerador. Em cada ciclo o programa fará uma busca no banco de dados para os dados mais recentes do gerador, como mencionado na seção, salvando-os em uma tabela, no banco de dados, como também no formato CSV.

Figura 4- Fluxograma para cálculo das variáveis de um gerador



Fonte: Autoria própria

A Figura 4 representa o ciclo de repetição para o cálculo das variáveis. Este fluxograma representa o bloco “Calcular novas variáveis a partir dos dados coletados” no fluxograma da Figura 3. O primeiro passo será converter as variáveis importadas para

ponto flutuante e inteiro, porque a biblioteca utilizada importa estes tipos de variáveis como se fossem texto. Após a conversão dos dados, calcula-se o consumo na partida, que será determinado criando-se um vetor de 10 posições, no qual serão guardados os últimos 10 valores da leitura de kVA. Caso a diferenciação desse vetor possua valores positivos, maiores que 150, indica uma partida. Agora, se negativos, indica uma pequena queda na tensão após a partida, neste caso, as primeiras posições do vetor de kVA são preenchidas com valor 0. Com isso, é possível encontrar as posições do vetor que indicam o momento da partida do gerador, a partir destas posições calcula-se o consumo de combustível deste período.

Após o cálculo do consumo na partida, calcula-se o tempo que o líquido do Intercooler (líquido de arrefecimento e óleo) fica acima da média. Primeiro, verifica-se se a temperatura está acima da média, caso esteja, calcula-se a diferença entre o marcador de tempo anterior e o atual e soma esse valor à variável responsável por guardar esses valores de tempo. Este processo é semelhante ao modo de cálculo do tempo que o gerador está em uma faixa de carga. Também existe uma condição comparativa para encontrar em qual faixa a variável de carga está. Quando encontrada, e se estiver em uma das faixas, adiciona-se a diferença das variáveis de tempo.

Outra etapa desse algoritmo é o cálculo do número de religamentos. O religamento de um gerador consiste em uma parada na geração de energia, entretanto, com reestabelecimento das condições normais de operação em um período de tempo considerado curto, aproximadamente 10 minutos nesta operação. Similar ao algoritmo para determinar o consumo de combustível na partida, o processo para determinar o número de religamentos começará pela diferenciação de um vetor de 10 posições. Este possui os valores de kVA de cada gerador e irá determinar os índices das posições desse vetor de modo que obedeçam às condições a seguir. A primeira condição é possuir um valor de kVA igual a zero, já a segunda, é apresentar diferenciação maior que 150. Caso encontre mais de dois índices que obedeçam às condições acima, é escolhido o último e o penúltimo índices, que serão chamados de Índices de Partida. O algoritmo também gera um vetor com os últimos 10 marcadores de tempo que será de suma importância para determinar o número de religamentos. Utilizando os Índices de Partida para escolher os marcadores de tempo com a mesma posição, determina-se o instante do suposto desligamento e religamento. Verifica-se também, se o intervalo de tempo entre as duas operações é maior ou menor do que 10 minutos. Caso seja, adicionar ao contador.

A última etapa no processamento de dados e umas das mais importantes é o cálculo da nota do gerador. Este processo, como mencionado anteriormente, ocorrerá realizando a multiplicação matricial entre o vetor de prioridade da matriz de julgamentos das prioridades e a matriz contendo as variáveis calculadas. O processo do cálculo do vetor de prioridade acontece por meio dos mesmos passos apresentados no Capítulo 3, mas com a matriz de julgamentos formada com valores determinados pelo usuário. Modifica-se o vetor de prioridades para melhor refletir as variáveis que influenciam positivamente ou negativamente o estado do motor. Essa modificação se dará multiplicando alguns elementos por -1, se tornando negativas, mas mantendo o módulo. Estas são:

- Tempo que o líquido de arrefecimento fica acima da média;
- Tempo que o líquido do Intercooler fica acima da média;
- Horímetro;
- Número de religamentos;
- Consumo de combustível;
- Consumo de combustível na partida.

Após determinados os valores finais do vetor de prioridades, realiza-se uma multiplicação vetorial com vetor de variáveis e o resultado será a nota do gerador, como indicado no tópico 4.1. Quanto menor a nota, pior o gerador e quanto maior a nota, melhor o gerador. A partir destas notas, ordenando-as somente, ocorre a geração dos ranques.

5. APLICAÇÃO DO SISTEMA

Tendo em vista capturar todas as variáveis essenciais ao funcionamento dos geradores, com a intenção de utilizá-las em um sistema inteligente de controle para uma planta termoelétrica de geração de energia, deve-se instalar diversos tipos de sensores. Além disso, módulos de comunicação, que permitirão a transmissão de dados entre os diversos tipos de equipamentos através das diferentes classes de barramento também são necessários. Com isso, é feita a caracterização de uma rede industrial, visando atender às demandas necessárias, que serão detalhadas ao longo deste capítulo.

Neste sentido, é interessante obter o máximo possível de indicadores referente aos geradores, com a maior integridade possível, pretendendo a impressão dos resultados com alto grau de confiabilidade em relação ao estado atual dos motores. Ainda, é exigido dos dados, alto grau de integridade, caso não possuam, os dados desqualificam os resultados da estratégia de controle, pois são considerados incompatíveis com a realidade, ocasionando perda de potência e desligamentos. Todos os itens pertinentes à rede de sensoriamento foram listados e especificados, considerando as características físicas e de comunicação comumente existentes em uma unidade termoelétrica de geração.

O sistema também é composto por uma interface gráfica interativa, que possibilitará ao usuário a alteração dos pesos comparativos par a par pertinente ao AHP. Esta interface foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação Python.

Outro componente importante do sistema é o programa supervisor. Ele possui a função de exibir as variáveis monitoradas e as que foram calculadas pelo sistema inteligente de ranqueamento em conjunto com o banco de dados. Este último, salvará todas as variáveis captadas, elas poderão ser acessadas através da linguagem SQL, que será implementada via Python. Todos os pontos mencionados acima serão detalhados ao longo deste capítulo.

5.1. MODBUS

MODBUS (SWALES, 1999) é um protocolo de comunicação simples que independe do vendedor, geralmente é utilizado em equipamento de controle, automação e sistemas de supervisão. O protocolo TCP, que foi utilizado neste projeto, é uma variação do protocolo MODBUS. Este, é comumente utilizado para anexar CLPs à rede, módulos de entrada e saída de sinais, trabalhando como um canal de conexão a barramentos.

A conexão pode ser facilmente reconhecida em nível de protocolo, podendo executar diversas transações de dados, por meio do protocolo MODBUS/TCP. O uso do TCP suporta diversas conexões simultâneas. O dispositivo que inicia a conexão é o que escolhe manter a conexão viva.

Outra vantagem da utilização do protocolo TCP está nas transações de dados que são facilmente identificadas, supervisionadas e canceladas. Ainda, permitem uma tolerância a diferentes níveis de flutuação na rede, possibilitando a adição de camadas de proteção como os firewalls.

5.2. CAN BUS

CAN BUS (RAN, 2010; PFEIFFER et al, 2008) é um protocolo de comunicação inventado pela empresa alemã BOSCH nos anos 80, com o objetivo de permitir a comunicação de diversos dispositivos controladores e sensores em um automóvel moderno. Esta troca de informação pode ocorrer em diferentes meios, como cabos coaxiais, cabos padrão e fibra óptica.

O protocolo permite uma troca de dados entre microcontroladores e diversos tipos de dispositivos sem que haja a necessidade de um computador hospedeiro. Utilizado quando é imperativo a multiplexação de sinais elétricos em ambientes industriais. A atuação do protocolo ocorre de maneira que todos os dispositivos conectados na mesma rede recebam a mensagem transmitida, inclusive o transmissor e o receptor com maior prioridade. Este último receberá a mensagem e comunicará os outros para não a processar, criando uma rede não centralizada, mas bem estruturada.

O CAN BUS possui uma variação que é o CAN OPEN que comumente é utilizada para redes de dispositivos embarcados, na qual é necessário configurações altamente flexíveis. O protocolo tira a responsabilidade do desenvolvedor de configurar a temporização de bit e filtros, responsáveis por aceitar os dados e prover padrões de comunicação para situações críticas e de gerenciamento da rede de dados. Esta praticidade

se reflete na implementação de sistemas, que em sua grande maioria podem ser instalados na rede sem maiores configurações.

5.3. Sensores de Fluxo

As medições do consumo dos geradores podem ser realizadas com uma estimativa, considerando as relações matemáticas com a potência gerada. Objetivando a acurácia dos dados adquiridos foram instalados medidores de fluxo para suprir tais necessidades, os mesmos foram instalados na entrada e saída do combustível dos geradores, como exibido na Figura 5. Utilizando esta estratégia, será possível que a medição seja realizada a cada instante de operação, sendo observado o consumo das unidades geradoras. A partir desta informação foi realizado a diferença entre o combustível na entrada e na saída do sistema das unidades geradoras.

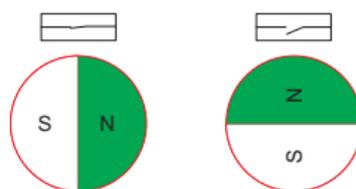
Figura 5 - Local de instalação do medidor de combustível – entrada



Fonte: Autoria própria

O sensor de fluxo utilizado é do tipo Reed Switch. Quando o sensor estiver em contato com somente um dos polos do rotor magnético, ficará aberto. Entretanto, quando estiver na zona entre dois polos, o sensor fechará. Estas atividades operativas do sensor foram exemplificadas na Figura 6.

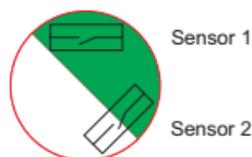
Figura 6 - Sensor Reed Switch sobre rotor magnético



Fonte: Texas Instruments, 2015

Dois sensores do tipo *Reed switch* são utilizados para detectar o sentido do giro do rotor magnético, que vai se mover no sentido da corrente do líquido sendo medido. Deste modo, é possível prevenir que ocorra a contagem equivocada da quantidade giros. Em um tipo diferente de arranjo para detectar fluxo, dois sensores Reed Switch são instalados com uma diferença de 45°, como na Figura 7. Devido ao posicionamento, ocorre uma defasagem entre a abertura e fechamento de ambos, permitindo detectar padrões. Quando gira no sentido positivo de contagem, a sequência de aberturas e fechamentos formará a lógica “10” e “01”. Agora, quando gira no sentido negativo de contagem, formará a sequência “00” e “11”. Com a adição de um circuito complementar, essa informação será transformada em sinal elétrico.

Figura 7 - Dois sensores Reed Switch sobre rotor magnético



Fonte: Texas Instruments, 2015

5.4. CLP concentrador e switch de rede

Os diversos dispositivos existentes no sistema proposto irão se conectar à rede montada para a transmissão de dados e mandar informações para o banco de dados. Desenvolver uma forma de acessar os dados de cada gerador com facilidade e de maneira rápida é extremamente importante.

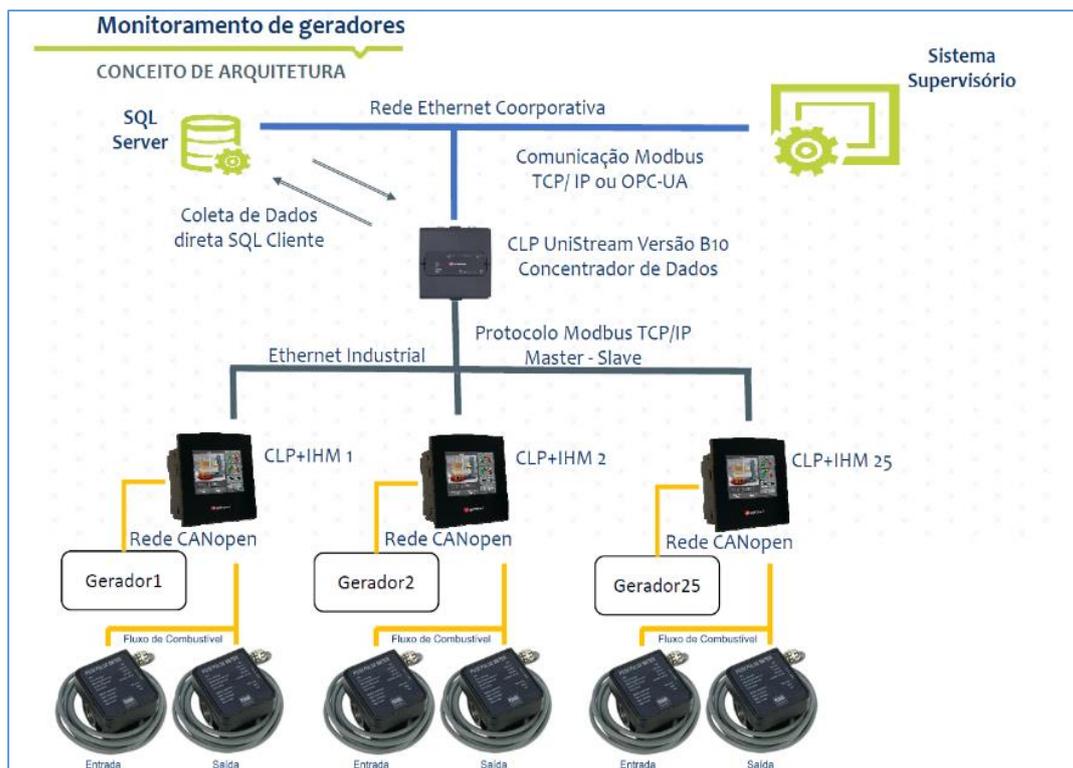
Com a limitação apresentada no parágrafo anterior, torna-se imprescindível uma forma de concentrar todos os dispositivos em um único equipamento, assim, adotando um CLP concentrador de rede. Este concentrador de rede disponibilizará os dados de todos os outros equipamentos no banco de dados. O CLP concentrador assume o papel de um único dispositivo, pois atua de forma independente do supervisor que foi utilizado na usina, gerando autonomia da solução. Para estabelecer a comunicação entre os dispositivos foi utilizado o protocolo MODBUS.

5.5. Estrutura da rede

Seguindo um dos objetivos do trabalho de montar uma rede de transmissão composta por diversos níveis, como apresentado na Figura 8, será configurada uma rede, na qual o primeiro nível é composto pelos sensores e pelos CLPs individuais de cada gerador. O sensor de fluxo irá se conectar diretamente ao CLP do gerador. Outra conexão será realizada entre o gerador e o controlador lógico programável utilizando o protocolo de rede CAN OPEN, que é uma variação do CAN BUS. A conexão entre o gerador e o CLP permitirá o acesso a algumas variáveis. Estas, quando coletadas pelo sistema de controle próprio do gerador, como alarmes, erros e variáveis de momento, serão transmitidas para o banco de dados.

No segundo nível está o switch de rede e o CLP concentrador de dados. Primeiramente, cada CLP está conectado ao switch via ethernet. Por outro lado, também acontece a conexão do switch com o CLP concentrador de redes. Este, como explicado anteriormente, permitirá a interação com os dados de todos os 99 geradores, atuando como um único dispositivo.

Uma camada mais elevada da rede será composta pelo banco de dados e o supervisor, que serão explorados com mais detalhes a seguir.



Fonte: Autoria própria

5.6. Sistema de banco de dados

Existe a necessidade de armazenamento dos dados obtidos pelos CLPs escravos na topologia descrita neste capítulo. Os dados resultantes da ferramenta computacional precisam ser arquivados. Neste sentido, programa-se um banco de dados para receber todas as informações, para que o supervisor consiga atualizar as telas exibidas. Estas informações referem-se ao ranqueamento dos geradores, aos indicadores específicos de cada variável relacionada às unidades geradoras. Como também, as telas de alarme, gráficos contendo os históricos dos ranques e repositório, onde são armazenados dados relevantes para o programa de análise. O repositório de dados foi gerado utilizando a linguagem SQL, que é própria para o bando de dados relacionais.

5.6.1. Banco de dados relacional

O banco de dados relacional foi criado em 1970 (CODD, 1989). Este é um tipo de banco de dados digital que utiliza do modelo relacional de estrutura de dados, no qual os dados são organizados em uma lista ordenada e finita de elementos, que também é denominada de *tuple*. Com isso, os usuários podem declarar qual informação está contida no banco de dados e qual dado é desejado. O restante será manipulado pelos programas de gerenciamento, como descrever estrutura de dados.

Outras vantagens são:

- **Consistência de dados:** o modelo é muito bom para manter a consistência dentro de diferentes aplicações, garantindo que múltiplas instâncias do banco de dados tenham a mesma informação. O que é muito difícil para outros tipos de banco de dados, quando a quantidade de dados aumenta consideravelmente;
- **Atomicidade:** imagine um *tuple* formado de três elementos, que fazem parte do mesmo pacote de informação. Agora, um dos dados do conjunto precisa ser retirado, resultando na remoção de todo o pacote. Este procedimento é chamado de Atomicidade e é importante porque garante a integridade dos dados da tabela;
- **Procedimentos armazenados:** banco de dados relacionais permitem que blocos de código possam ser executados com sua simples chamada, este procedimento é conhecido como procedimentos armazenados. O procedimento permite, por exemplo, que um simples bloco de código possa ser utilizado diversas vezes de maneira consistente em ciclo de repetição;
- **Travamento de banco de dados:** caso o banco de dados seja acessado e ocorra uma tentativa de modificação por diferentes usuários no mesmo instante de tempo, vai ocorrer um bloqueio dos dados, evitando conflitos no acesso e preservando a integridade dos dados. Entretanto, um ponto negativo disso é o bloqueio do banco de dados quando ele está sendo atualizado, o que pode diminuir a performance do processo.

5.6.2. Linguagem SQL

Para acessar e programar os bancos de dados relacionais utiliza-se a linguagem de programação chamada SQL (JMELTON, 1993). É uma linguagem simples e do tipo declarativa. O programa em grande parte vai se preocupar com a lógica do procedimento e não em descrever o procedimento. A linguagem é bastante utilizada por cientista de dados.

Os comandos mais básicos são os seguintes:

- SELECT: busca linhas em tabelas de acordo com um critério definido dentro da chamada cláusula de WHERE;
- INSERT: insere novas linhas na tabela, neste trabalho, é responsável por colocar novos dados pertinentes aos geradores;
- UPDATE: atualiza linhas do banco de dados de acordo com um critério de WHERE;
- DELETE: remove linhas da tabela de acordo com um critério.

5.6.3. Estrutura e tabelas do banco de dados

O banco de dados é responsável por armazenar todas as informações coletadas dos geradores, possui diversas tabelas, cada uma responsável por guardar diferentes dados.

A primeira discussão abordada nesta seção refere a tabela denominada “GeradoresAtual”, onde são exibidas as informações relacionadas aos estados de funcionamento dos geradores. A função desta tabela será indicar para supervisorio quais unidades estão gerando, de forma a exibir essa informação em uma das telas do supervisorio. O programa de processamento de dados também interpretará esta tabela para iniciar ou não o processo de cálculo. Se nenhum gerador estiver gerando, economiza-se poder de processamento, quando não executado todo o código, mas sim, apenas, atualizando as variáveis de tempo de cada ranque.

Outra tabela é a “GEN_HIST_RANK que irá salvar o ranque atual, o melhor e o pior ranque para cada gerador, mas também o horário que a tabela foi atualizada. Essa será umas das tabelas que o supervisorio utilizará para mostrar informações rápidas ao usuário. Semelhante à tabela anterior, a tabela “GEN_RANK” também irá guardar as informações de ranque, mas somente o atual, com o horário da atualização. As tabelas

possuem informações parecidas, entretanto, realizar a busca de informações como somente o ranque atual seria uma ação complexa e complicada, devido à característica da linguagem SQL. Portanto, optou-se em fazer uma outra tabela por questões de simplificação da ação ou processo.

Por último, descrevem-se as tabelas individuais para cada gerador. Os dados destas tabelas serão apresentados nas janelas individuais para cada unidade. Na Figura 9, demonstra-se como foram salvas as informações dentro das tabelas para cada gerador dentro do banco de dados.

Figura 9 - Exemplo de uma tabela de dados individuais para cada gerador

	E3TimeStamp	FP	FP_Quality	KW	KW_Quality	KVA	KVA_Quality	KVAR	KVAR_Quality	IA	IA_Quality	IB	IB_Quality	IC	IC_Quality	FREQ	FREQ_Quality	BATT	BATT_Quality	Consumo	Consumo_Quality	ICT	ICT_Quality	ICP
1	2019-11-22 08:31:44.850	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
2	2019-11-22 08:31:49.773	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
3	2019-11-22 08:31:54.800	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
4	2019-11-22 08:31:59.827	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
5	2019-11-22 08:32:04.857	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
6	2019-11-22 08:32:09.780	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
7	2019-11-22 08:32:14.807	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
8	2019-11-22 08:32:19.837	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
9	2019-11-22 08:32:24.767	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
10	2019-11-22 08:32:29.797	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
11	2019-11-22 08:32:34.823	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
12	2019-11-22 08:32:39.850	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
13	2019-11-22 08:32:44.777	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
14	2019-11-22 08:32:49.807	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
15	2019-11-22 08:32:54.837	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
16	2019-11-22 08:32:59.867	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
17	2019-11-22 08:33:04.793	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
18	2019-11-22 08:33:09.823	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
19	2019-11-22 08:33:14.853	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
20	2019-11-22 08:33:19.780	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
21	2019-11-22 08:33:24.810	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96
22	2019-11-22 08:33:29.840	0,08	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	0	192	24,4	192	0	192	23,6	192	0,96

Fonte: Autoria própria

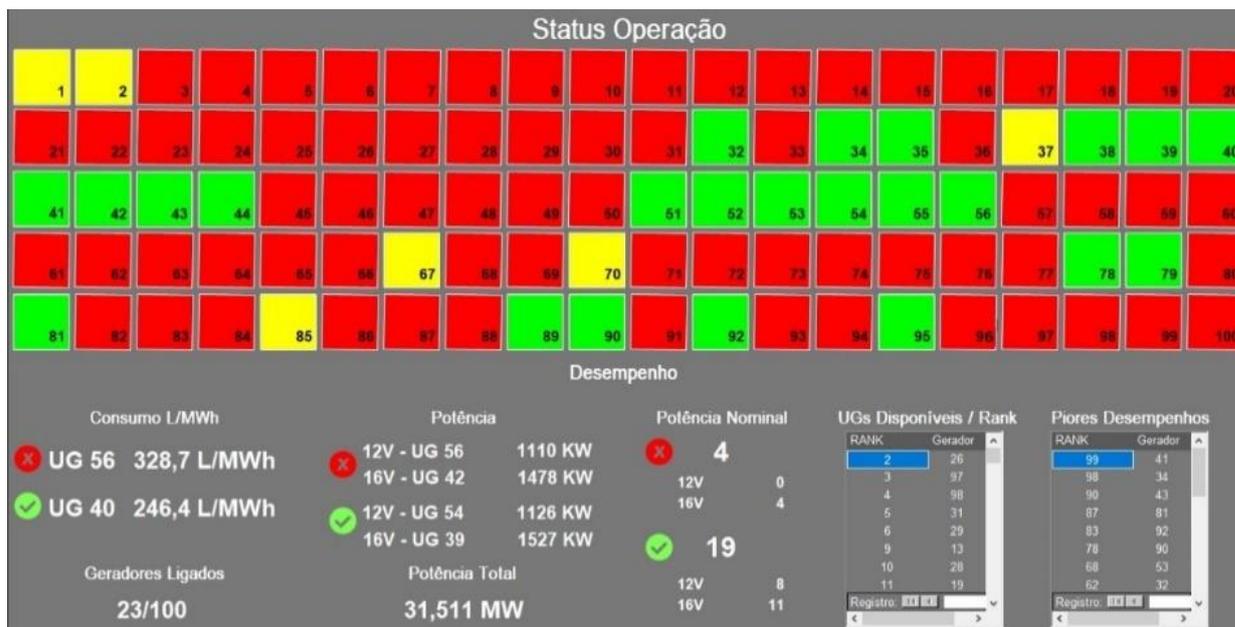
5.7. Sistema supervisório

O supervisório foi projetado utilizando a linguagem Eclipse E3. O objetivo foi condensar todas informações geradas pelo CLP concentrador, as análises da ferramenta computacional e os dados necessários presentes no banco de dados.

O sistema utilizado pelo operador exibirá duas telas. Uma delas traz informações gerais, indicando o estado de operação de todos os geradores e outras informações adicionais, já a segunda tela trará as informações individuais para cada unidade geradora.

A Figura 10 apresenta a tela principal. Percebe-se que há um quadrado para cada gerador da planta. A cor indica o status do gerador, vermelho indica que a unidade geradora não está em operação, a cor verde que está funcionando e a cor amarela indica algum erro. No canto inferior direito está o ranque geral das unidades geradoras, divididas entre o melhor desempenho e o pior. Já no canto inferior esquerdo, estão as informações relativas à operação das unidades geradoras.

Figura 10 - Tela inicial do supervisório



Fonte: Autoria própria

A Figura 11 exemplifica a tela com os dados individuais para o gerador 89. Nesta tela está o histórico de ranque para o gerador e vários indicadores do estado como a potência gerada, consumo e outros.

Figura 11 - Tela individual para o gerador 89

- Orientação a objeto: orientação a objeto permite a adição de características e capacidades aos dados que estão sendo processados ao código.
- Extensibilidade: independentemente da quantidade de linhas adicionada ao código, é possível organizar o script de maneira lógica. O algoritmo pode ser dividido em diversos módulos, que por sua vez podem acessar as funções pertencentes ao conjunto, uma dentro da outra. A definição deste acesso sempre será da mesma forma, independente de qual local está ocorrendo o acesso. Esta característica permite desenvolver códigos mais customizados e uma programação mais flexível.

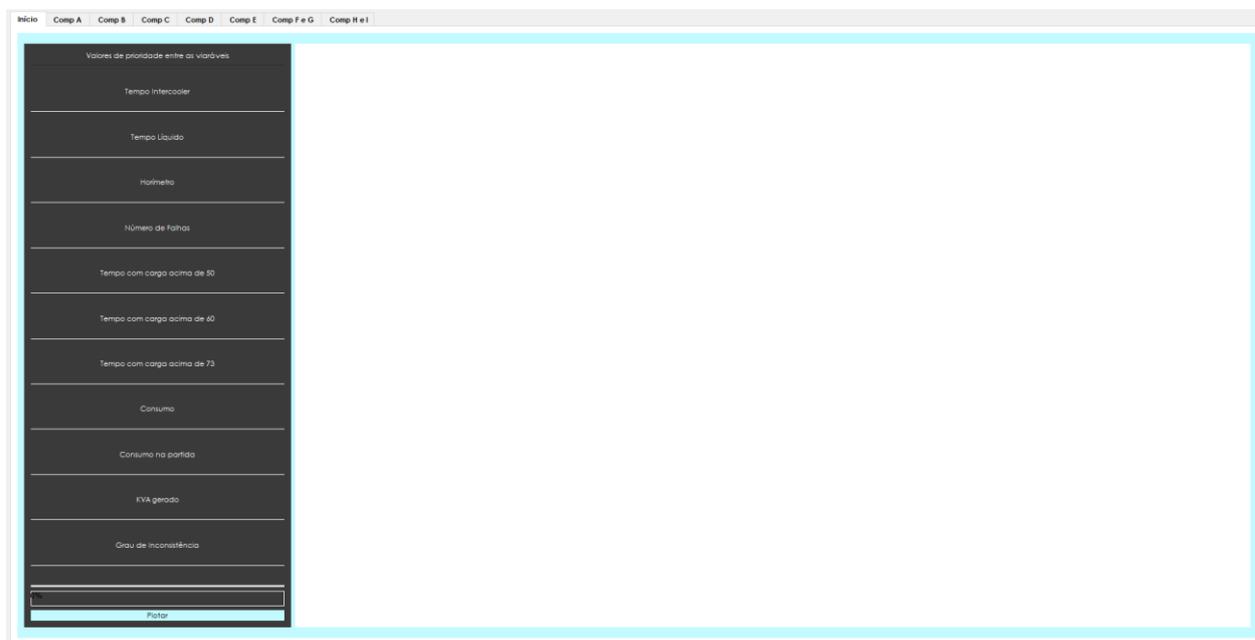
Todos esses pontos foram levados em consideração na hora de escolher a linguagem de programação Python para formular o sistema de ranqueamento de geradores.

5.9. Implementação do sistema inteligente

O programa desenvolvido em Python será executado em segundo plano. Se o operador quiser conferir o funcionamento do programa, será necessário acessar um ícone disponível na barra de ferramentas. Basta clicar neste ícone, e então, serão apresentadas as opções de encerramento do programa, a possibilidade de abrir ou fechar uma janela. Caso o ícone não esteja disponível na barra de ferramentas, o programa não está sendo executado. Para garantir que o sistema está sendo executado, configura-se o sistema operacional, visando a sua correta inicialização. O programa responsável pelo ranqueamento também será executado.

Quando é desejado abrir a janela inicial do programa de análise de dados, aparecerá uma tela com uma barra cinza a esquerda indicando a prioridade de cada critério e o grau de consistência, como demonstrado na Figura 12. Além disso, a mesma tela possui uma barra de progressão para o processo de cálculo do ranqueamento. Na parte da direita da tela inicial, tem um espaço em branco para plotar um gráfico com as notas de cada gerador. Também na imagem percebe-se as abas “Comp A”, “Comp B”, “Comp C”, “Comp D”, “Comp E”, “Comp F e G”, “Comp H e I”, as quais apresentam os controles deslizantes, onde ocorrem as comparações paritárias para os critérios, do método de análise hereditária.

Figura 12 - Tela inicial do programa de análise dos dados

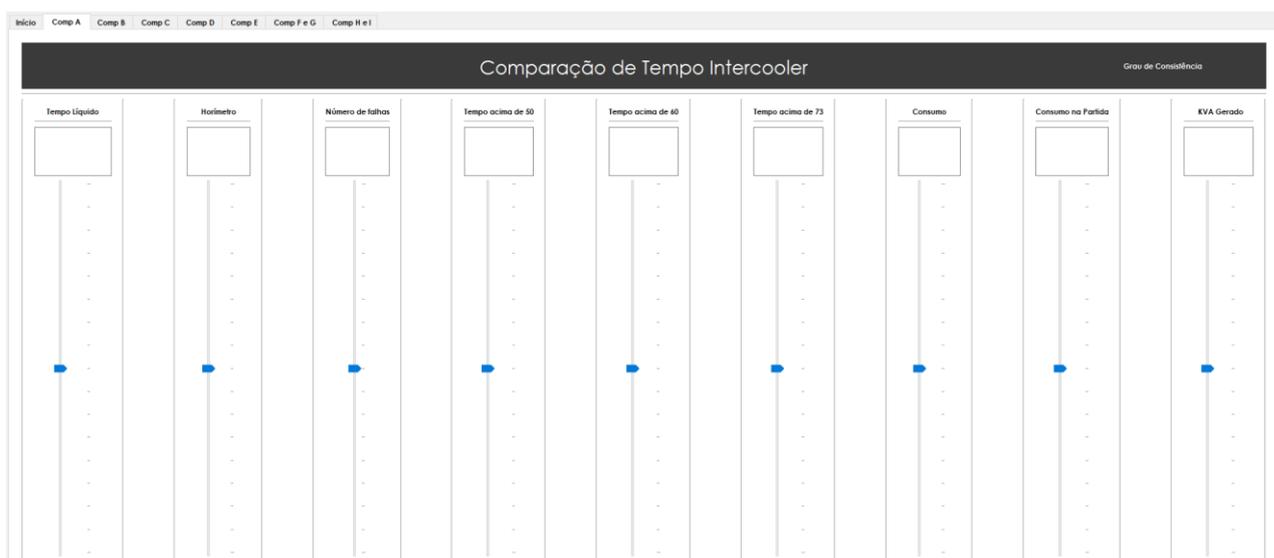


Fonte: Autoria própria

As abas possuem uma ou duas variáveis de controle que foram selecionadas para comparação com as outras variáveis. Na Figura 13, como exemplo, a variável tempo de “Tempo Intercooler” será comparada com o restante. Para facilitar a programação do código, bem como sua agilidade, foi utilizado o princípio da reciprocidade do AHP para preencher a matriz de critérios, diminuindo o número de controles deslizantes por variável. Cada controle gerará um número dentro da Escala Fundamental de Saaty em concordância com a posição do indicador azul, sendo a posição mais inferior equivalente ao valor de $1/9$ e a posição superior equivalente ao valor 9.

Todas as telas terão um indicador do grau de inconsistência proveniente do processo de análise hierárquica, porque é importante para o operador saber o quão inconsistente está a matriz de julgamentos enquanto ele altera os valores das comparações paritárias, através dos controles deslizantes.

Figura 13 - Tela com os comparadores entre as variáveis



Fonte: Autoria própria

5.10. Algoritmo de classificação

Um programa para classificar e ranquear os geradores foi desenvolvido utilizando a linguagem Python. O desenvolvimento foi separado em partes: inicialização, acesso ao banco de dados, processamento dos dados e salvamento dos dados. A parte de processamento de dados já foi discutida no Capítulo 4, então este trecho da dissertação tratará somente da inicialização e acesso ao banco de dados. As partes serão mais detalhadas, discutindo quais bibliotecas e operações matemáticas que foram utilizadas.

5.10.1. Inicialização

No momento em que o programa começa a ser executado uma função de inicialização é chamada para configurar alguns parâmetros e variáveis para que o algoritmo seja executado da maneira esperada. Primeiro, cria-se o objeto de tela principal, importando o arquivo gerado no *qtDesigner*, que vai trazer consigo todos os arranjos das janelas iterativas, mas também a declaração do tamanho inicial da tela. Continuando nas partes gráficas da inicialização do programa, serão configuradas telas de aviso que indicam se algum tipo de erro ocorreu. Ainda há o carregamento da imagem que vai ficar na bandeja da barra de ferramentas e todas as interações irão ocorrer. Ao clicar com o botão direito do mouse no ícone, as opções de encerrar o programa, fechar ou abrir a

janela irão aparecer em uma caixa de texto, basta clicar sobre elas e as respectivas ações serão realizadas.

Terminada a parte de inicialização do programa em relação as partes gráficas, ocorrerá a inicialização de variáveis, processos aritméticos e processos secundários que irão auxiliar no funcionamento do programa. Primeiro, inicializam-se as *threads* (ZACCONE, 2019), elas permitirão que as janelas interativas possam ser utilizadas enquanto alguma função está sendo executada, não travando a mesma. Foram criadas seis *threads* para este algoritmo, isso quer dizer que até seis funções podem ser executadas sem travar o resto do programa. Após as *threads* terem sido inicializadas, as funções irão inicializar as caixas de texto das janelas interativas e os indicadores do grau de inconsistência. Outras caixas de textos, que indicarão as prioridades de cada critério dentro do AHP, e realizarão um cálculo inicial do processo de análise hierárquica, também serão inicializados, neste caso, para exibir os valores na tela inicial do programa.

5.10.2. Acesso ao banco de dados

Ainda dentro da rotina de inicialização, a conexão com o banco de dados é estabelecida. A biblioteca Pyodbc (SIGNORE et al, 1995) permite conexões com o banco de dados por meio da linguagem de programação Python. O banco de dados utiliza um gerenciador do tipo ODBC. Para realizar esta interligação é necessário passar como parâmetro para a função, que é específica para conexões não existentes no computador local, o tipo de driver do banco de dados, o usuário e senhas para acessos e o nome do local dentro do repositório de dados, sendo, este último, alvo para a retirada dos dados. Caso não ocorra problemas no processo de ligar o banco de dados e o programa de processamento, um indicador do status da conexão será impresso no console para que o usuário possa verificar o que está ocorrendo. Após se conectar ao banco de dados, verifica-se quais tabelas estão disponíveis e quais possuem os dados individuais de cada gerador. Deste modo, um comando em SQL será executado para retornar um vetor (MCKINNEY, 2010) com todos os nomes das tabelas e a partir deste vetor, outro será gerado, entretanto, com os índices dos geradores disponíveis. Este processo garantirá que o algoritmo processará somente os dados dos geradores que possuem uma tabela disponível, caso ocorra algum problema e uma delas seja apagada.

Outra instância em que ocorrerá o acesso ao banco de dados é durante a rotina principal de processamento. Nesta, as buscas serão realizadas nas tabelas de dados dos

geradores para capturar as informações mais recentes e guardá-las em uma tabela, que será consultada a cada ciclo do algoritmo principal. Também ocorrerá a consulta para verificar se algum gerador está funcionando, já que uma tabela mantém um indicador para cada unidade, com o objetivo de verificar se a mesma está em funcionamento. Estes indicadores serão salvos em uma tabela para uso posterior.

O último momento em que haverá uma transferência de dados com o repositório de dados será após o processamento de todas as informações e ranqueamento das unidades geradoras. Na base online, uma tabela com os melhores, os piores e ranques atuais de cada gerador, mas também, uma outra tabela contendo o ranque atual e os marcadores de tempo, serão atualizadas.

Neste estudo foi realizada a análise dos dados dos geradores para os dias 01/10/2020 e 02/10/2020 da planta termoeletrica utilizada como aplicação de campo do sistema desenvolvido. As análises ocorreram com diferentes conjuntos de pesos para exemplificar que a classificação entre um gerador com performance abaixo ou acima do esperado pode depender da métrica que está sendo utilizada. Cada conjunto de pesos será detalhado em diferentes cenários ao longo deste capítulo. Os gráficos de barras apresentados nos cenários tiveram os eixos da abcissa normalizados em relação a nota de maior valor absoluto, com objetivo de facilitar a leitura e comparação entre as unidades.

6.1. Cenário 1

Neste primeiro cenário, o ranqueamento foi realizado assumindo o mesmo peso para todas as variáveis na matriz de critérios para analisar como será o ranque dos geradores, sem nenhuma ênfase em um critério específico. A distribuição dos pesos é exemplificada pela Tabela 17.

Tabela 17 - Tabela com o vetor prioridade do AHP para o Cenário 1

Variável	Prioridade
Tempo do Líquido de Intercooler acima da média	-0,1
Tempo do Líquido de arrefecimento acima da média	-0,1
Horímetro	-0,1
Número de Religamentos	-0,1
Tempo com carga entre 50% e 60%	0,1
Tempo com carga entre 60% e 73%	0,1
Tempo com carga entre 73%	0,1
Consumo	-0,1
Consumo na Partida	-0,1
KVA	0,1

Fonte: Autoria própria

A matriz de julgamentos terá todos os elementos semelhantes. Deste modo, é simples a dedução sobre o grau de inconsistência, que será zero. Considerando o mesmo vetor de prioridade, é perceptível que o pior gerador foi 84 e o melhor foi o 83.

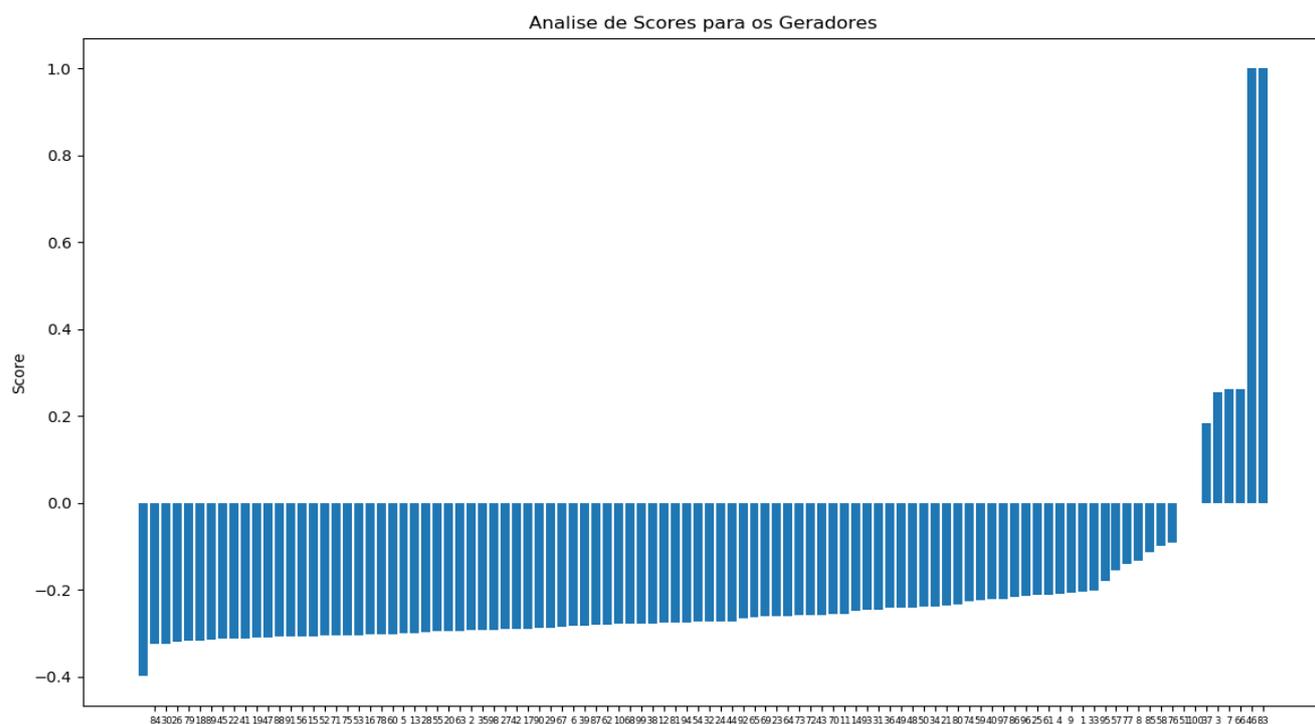
Tabela 18 - Grau de inconsistência e ranqueamento do Cenário 1.

Grau de Inconsistência	0%
Melhor Gerador	83
Pior Gerador	84

Fonte: Autoria própria

Ao analisar o ranqueamento das unidades geradoras para este cenário, mostrado na Figura 15 é constatado que boa parte dos geradores tiveram uma nota negativa, permanecendo em torno de -0,3 e -0,2. A maioria dos geradores obtiveram uma nota negativa, indicando a presença de algum fator que impacta negativamente o funcionamento do gerador. Este fator teve grande participação na nota final. Investigando os valores que compuseram a nota final, tem-se o tempo que o gerador permaneceu com a temperatura do Intercooler acima da média e o horímetro como as maiores contribuições. Também, em relação as notas positivas, o principal contribuinte foi o tempo de operação com carga acima de 73%.

Figura 15 - Gráfico de com o ranque dos geradores para o Cenário 1



Fonte: Autoria própria

6.2. Cenário 2

Para o Cenário 2, um vetor de prioridades diferente foi calculado, como mostra os pesos na Tabela 19. Percebe-se que a variável “tempo do líquido de Intercooler”, que permaneceu acima da média, é um dos principais contribuidores para a nota baixa dos geradores. Neste caso, é necessário aumentar o peso desta variável na matriz de julgamentos, resultando em um grau de inconsistência de 9,2% para o Cenário 2. Também foram computadas as notas para este cenário.

Tabela 19 - Tabela com o vetor prioridade do AHP para o Cenário 2

Variável	Prioridade
Tempo do Líquido de Intercooler acima da média	-0,27
Tempo do Líquido de arrefecimento acima da média	-0,06
Horímetro	-0,08
Número de Religamentos	-0,1
Tempo com carga entre 50% e 60%	0,07
Tempo com carga entre 60% e 73%	0,07
Tempo com carga entre 73%	0,07
Consumo	-0,1
Consumo na Partida	-0,08
KVA	0,1

Fonte: Autoria própria

Como apresentado na Tabela 20, a pior nota foi a do gerador 84 e a melhor nota foi do gerador 82. O gerador 84 continua com a pior nota, o que pode indicar alguma falha na unidade geradora. A melhor nota passou a ser do gerador 82, pelo fato do horímetro ter mais participação na nota do mesmo que o tempo do líquido de intercooler que fica acima da média, então removendo o impacto do horímetro na nota final, melhora-se a posição final do gerador 82.

Tabela 20 - Tabela com grau de inconsistência e ranqueamento do Cenário 2

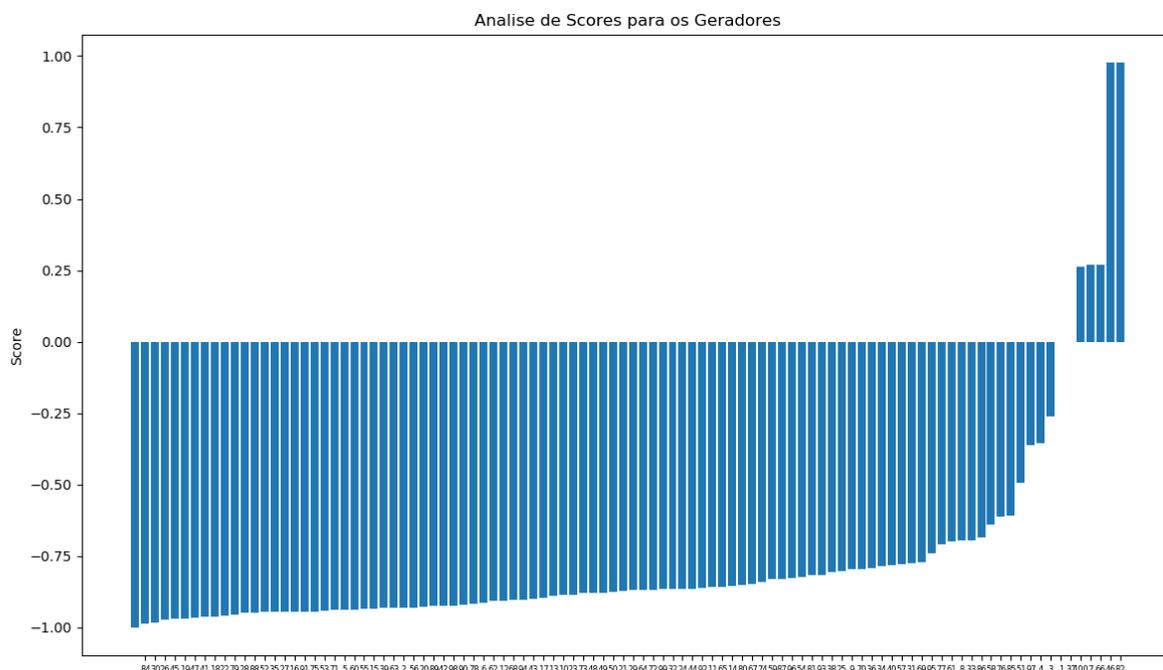
Grau de Inconsistência	9,2%
Melhor Gerador	82
Pior Gerador	84

Fonte: Autoria própria

Outro efeito proporcionado pela mudança no vetor de prioridades foi o maior número de geradores com notas negativas e um módulo maior das mesmas. Alguns geradores chegaram próximo ao valor -1, indicando que a mudança na matriz de

juizamentos teve uma profunda percepção dos estados dos geradores, como apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Gráfico de com o ranque dos geradores para o Cenário 2



6.3. Cenário 3

No Cenário 3, foi investigado se outro conjunto de prioridades acarretaria uma nova mudança na avaliação final dos geradores, e se esta, possuiria maior impacto. A variável que terá o peso aumentado será o tempo de funcionamento com carga acima de 73%, pois esta variável tem uma característica que impacta positivamente a avaliação dos geradores. O vetor de prioridades da matriz de julgamentos, neste caso, está representado na Tabela 21.

Tabela 21 - Tabela com o vetor prioridade do AHP para o Cenário 3

Variável	Prioridade
Tempo do Líquido de Intercooler acima da média	-0,06
Tempo do Líquido de arrefecimento acima da média	-0,07

Horímetro	-0,06
Número de Religamentos	-0,06
Tempo com carga entre 50% e 60%	0,07
Tempo com carga entre 60% e 73%	0,06
Tempo com carga entre 73%	0,35
Consumo	-0,09
Consumo na Partida	-0,09
KVA	0,09

Fonte: Autoria própria

Como indicado na Tabela 22, o melhor gerador para este conjunto de pesos foi o 83, porém o gerador 89 foi o pior. A matriz de julgamentos tem um grau de inconsistência de 8,1%, que também está abaixo do valor recomendado de 10%. Vale salientar que a unidade 83 voltou a ser a unidade com a maior nota, conseqüentemente a melhor posição no ranqueamento. Devido, em grande parte, ao alto número de minutos que o gerador em questão passou com carga acima de 73%.

Tabela 22 - Tabela com grau de inconsistência e ranqueamento do Cenário 3

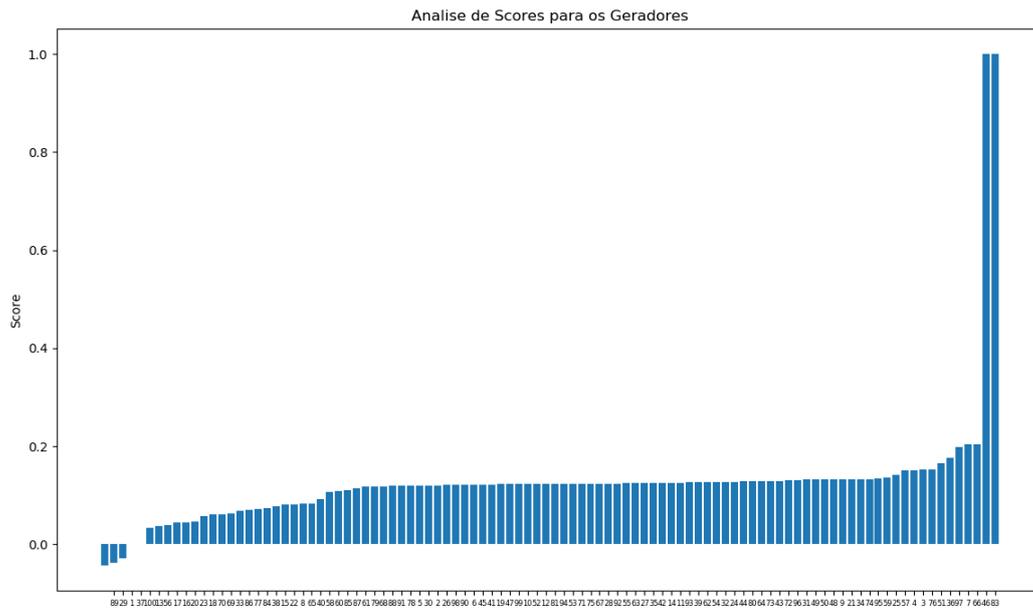
Grau de Consistência	8,1%
Melhor Gerador	83
Pior Gerador	89

Fonte: Autoria própria

Mudando a prioridade dada as variáveis do ranqueamento, uma grande mudança no ranqueamento e nas notas pode ser observado, como pode ser visualizado na Figura 20. A análise apresenta que, diferentemente dos Cenários 1 e 2, nos quais uma grande parte das unidades se encontrava com uma nota negativa; agora, somente 3 geradores possuem notas negativas, como apresentado na Figura 17. O impacto das variáveis horímetro e tempo de funcionamento com a temperatura de Intercooler acima da média que são consideravelmente altas (unidades 89, 29 e 1).

Sobre as notas positivas, as unidades 83 e 86 tiveram uma nota muito alta comparada com as outras notas positivas. O restante das notas, foram positivas também, mas ficaram com um módulo entre 0,1 e 0,2.

Figura 17 - Gráfico de com o ranque dos geradores para o Cenário 3



Fonte: Autoria própria

7. CONCLUSÕES

Concluiu-se que é possível aumentar a eficácia dos diagnósticos dos geradores ao se implementar uma rede inteligente de monitoramento e análise de dados, além de mostrar que a ferramenta matemática desenvolvida foi capaz de ranquear de forma eficiente e em tempo real.

Primeiramente, é de extrema importância ressaltar a ferramenta matemática desenvolvida que é baseada no Processo de Análise Hierárquico. Sem esta modificação, a implementação do sistema inteligente de ranqueamento funcionando em tempo real se tornaria improvável, devido ao fato da grande quantidade de dados a serem analisados provenientes dos geradores.

Esta dissertação também apresentou uma solução para integrar os geradores e seus sensores a um conjunto de novos de sensores e também a um banco de dados com capacidade de guardar tabelas com diversas variáveis de cada unidade. Também foi desenvolvido um programa supervisorio que apresentará os dados a um operador. A estrutura de rede montada para este trabalho mostrou-se robusta e confiável. Durante todos os testes e períodos subsequentes de funcionamento não ocorreu problemas na transmissão dos dados, mesmo com uma quantidade considerável de geradores em operação simultânea, resultando em uma grande quantidade de informações que são transmitidas ao mesmo tempo.

O conjunto formado pelo banco de dados e o programa supervisorio é uma ferramenta de extrema importância. O banco de dados conseguiu guardar e organizar uma grande quantidade de variáveis, dos mais diversos tipos, através da linguagem de programação SQL. Dentro do banco de dados, foram criadas estruturas que são capazes de indicar quais geradores estão em funcionamento, se os dados presentes nas tabelas estão atualizados ou não, e a confiabilidade dos conteúdos das tabelas. O programa supervisorio permitiu visualizar os dados de maneira bem intuitiva, seja os dados gerais ou individuais dos geradores, tirando a necessidade de qualquer tipo de acesso ao banco de dados por parte do operador ou processamento das informações salvas.

A linguagem de programação Python permitiu desenvolver e integrar diversas partes do presente trabalho. O programa de análise matemática foi uma ferramenta bastante intuitiva de ser utilizada pelo operador, com capacidade de mudar o perfil da

análise dos dados sem a necessidade de possuir um conhecimento prévio em matemática ou do funcionamento do algoritmo. Além disso, a análise dos ranques para os diferentes cenários, foi possível identificar quais geradores tiveram seus indicadores fora dos padrões aceitáveis. A linguagem de programação também foi bastante eficiente em captar dados nos diversos formatos existentes, seja eles provenientes do banco de dados ou planilhas do computador local.

É importante ressaltar o impacto que o sistema inteligente teve no funcionamento da planta de geração de energia. Como mencionado anteriormente, a usina utilizada como estudo de caso possui categorizações em seu funcionamento devido a sua classificação perante a ANEEL, não possuindo um funcionamento planejado e periódico, podendo ser acionada de forma excepcional para complementar o planejamento do ONS. Além do mais, a restrição de tempo para a sincronização da primeira unidade de geração e alcance da potência máxima deve ser 30 minutos. Antes da implementação do sistema, a manutenção e partida dos geradores eram tarefas mais difíceis, principalmente a partida dos motores. A manutenção atualmente ocorre de maneira mais eficiente e preditiva, possibilitando um nível mais alto de prontidão das máquinas. Estes benefícios são provenientes da capacidade da ferramenta de análise fornecer um ranque com as melhores e piores notas, como também do supervisor, que mostra o histórico das variáveis e apresenta diversos parâmetros em tempo real. Sobre a partida dos motores, caso a usina seja requerida para gerar pelo ONS, tornou-se mais robusta e confiável. Anteriormente à implementação do sistema de controle, não havia uma percepção concreta do estado dos geradores ao realizar a partida remota, sendo necessário enviar, em diversos momentos, operadores ao campo para reconfigurar geradores e verificar os indicadores. Neste período, poderiam ocorrer falhas consideráveis, responsáveis por aumentar significativamente o tempo até o atingimento do nível de potência máxima. Com isso, a usina termoeletrica não estaria disponível para cumprir as demandas do ONS corretamente.

7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma sugestão para trabalhos futuros é aprimorar o modo de definição das prioridades, através da implementação da lógica fuzzy (REZA BAGHAEI, 2011). Com isso, será possível determinar a magnitude das prioridades para cada critério ou até mesmo interpretar o próprio resultado da lógica fuzzy como critérios de avaliação das

alternativas. Estas, seriam comparadas par a par pelo AHP, aumentando a robustez do sistema de controle e monitoramento da planta termoelétrica energia, ao adicionar outras formas de definir quais alternativas teriam mais prioridade.

Outra sugestão para melhoria é a criação de uma nova interface para o processo de comparação paritária. Apesar de intuitivo, a tela possui um número considerável de abas e controles deslizantes, que mesmo utilizando o princípio da reciprocidade do AHP, pode demorar para realizar todas as comparações. Neste tempo, o operador poderia estar atuando no reparo e monitoramento das unidades geradoras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CODD, Edgar. **Relational database: a practical foundation for productivity**. Em: Readings in Artificial Intelligence and Databases. Morgan Kaufmann, 1989. p. 60-68.

FONSECA, Milton; BERZERRA, Ubiratan; DE ALMEIDA BRITO, Júnior; LEITE, Jandeci; HENRIQUE REIS NASCIMENTO, Manoel. **Pre-dispatch of load in thermoelectric power plants considering maintenance management using fuzzy logic**. IEEE Access, vol. 6, pp. 41379-41390, 2018

JMELTON, Jim; SIMON, Alan. **Understanding the new SQL: a complete guide**. Morgan Kaufmann, 1993.

SANNER, Michel F. et al. **Python: a programming language for software integration and development**. JMol Graph Model, v. 17, n. 1, p. 57-61, 1999.

MARINS, Cristiano Souza; SOUZA, Daniela de Oliveira; BARROS, Magno da Silva. **O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso**. XLI SBPO, v. 1, p. 49, 2009.

MCKINNEY, Wes et al. **Data structures for statistical computing in python**. Proceedings of the 9th Python in Science Conference. 2010. p. 51-56.

MTU 12V4000 DS1550. 2019 Disponível em: < https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/power-generation/diesel/50-hz/mtu-4000-ds_1600-4000-kva/32310231_PG_spec_16V4000DS2050_2070kWe_FC_60Hz.pdf/_jcr_content/renditions/original/32310231_PG_spec_16V4000DS2050_2070kWe_FC_60Hz.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2020.

MTU16V4000DS2050, 2019. Disponível em: < https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/power-generation/diesel/50-hz/mtu-4000-ds_1600-4000-kva/32310221_PG_spec_12V4000DS1550_1550kWe_FC_60Hz.pdf/_jcr_content/renditions/original/32310221_PG_spec_12V4000DS1550_1550kWe_FC_60Hz.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2020.

ONS, **IPDO – Informativo preliminar diário da operação**. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/IPDO-17-01-2021.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2021.

ONS, **Evolução da capacidade instalada no SIN – DEZ2021/DEZ2025**. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 18 jan. 2021.

ONS, **Submódulo 10.13. – Apuração de geração e de indisponibilidade de empreendimento de geração**.

Disponível em: http://www.ons.org.br/ProcedimentosDeRede/M%C3%B3dulo%2010/Subm%C3%B3dulo%2010.13/Subm%C3%B3dulo%2010.13_Rev_1.1.pdf#search=10%2E13>. Acesso em: 18 jan. 2021.

ONS, **Submódulo 26.2. – Critérios para classificação da modalidade de operação de usinas**. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2026%2FSubm%C3%B3dulo%2026.2%2FSubm%C3%B3dulo%2026.2%202020.01.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2021.

PFEIFFER, Olaf; AYRE, Andrew; KEYDEL, Christian. **Embedded networking with CAN and CANopen**. Copperhill Media, 2008.

RAN, Li et al. **Design method of CAN BUS network communication structure for electric vehicle**. Em: International Forum on Strategic Technology 2010. IEEE, 2010. p. 326-329.

REZA BAGHAEI, Hamid; ABEDI, Mehرداد. **Calculation of weighting factors of static security indices used in contingency ranking of power systems based on fuzzy logic and analytical hierarchy process**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 33, n. 4, p. 855-860, 2011.

SAATY, Thomas. **Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary**. European journal of operational research, v. 145, n. 1, p. 85-91, 2003.

SAATY, Thomas. **Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP)**. Journal of systems science and systems engineering, v. 13, n. 1, p. 1-35, 2004.

SWALES, Andy et al. **Open modbus/tcp specification**. Schneider Electric, v. 29, 1999.

TIDESIGNS: Flow Measurement with Reed Switches and BLE. 2015. Disponível em: <<http://https://www.ti.com/lit/ug/tidub33/tidub33.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2020.

ZACCONE, Giancarlo. **Python parallel programming cookbook**. Packt Publishing Ltd, 2015.

SIGNORE, Robert; STEGMAN, Michael; CREAMER, John. **The ODBC solution: Open database connectivity in distributed environments**. McGraw-Hill, Inc., 1995.

APÊNCICE A

**Artigo publicado na Brazilian Archives of Biology and
Technoloy em 2021**



1
2 Vol.xx: e00000000, 2019
3 <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-00000000000>
4 ISSN 1678-4324 Online Edition
5
6

7 *Article*

8 **Intelligent System for Dispatch Ranking of Generating** 9 **Units in Thermoelectric Power-Plants**

10
11
12
13 **Ricardo B. de Almeida Campos^{1,2}, Frederico de Oliveira Assunção^{1,2}, Elvis Ricardo de Oliveira¹,**
14 **Luiz Eduardo Borges da Silva², Erik L. Bonaldi¹**

15
16 **Germano Lambert-Torres^{1*}**
17 <https://orcid.org/0000-0003-3789-4696>
18

19 **Levy Ely de Lacerda de Oliveira¹, Herbert Marques³, Vinicius Martins Gontijo³, and Rodrigo Oliveira**
20 **Rosa Bizinotto³**

21
22 ¹Gnarus Institute, Itajuba, MG, Brazil; ²Itajuba Federal University, Institute of System Engineering and Information
23 Technology Itajuba, MG, Brazil; ³Palmeiras de Goiás Power Plant, Palmeiras de Goiás, GO, Brazil.

24 Received: 2021.03.25; Accepted: YYYY.MM.DD.
25

26 *Correspondence: germanoltorres@gmail.com; Tel.: +55-35- 3622-0132
27
28

29 **HIGHLIGHTS**

- 30
- 31 • Ranking for dispatching of power generator units.
- 32
- 33 • Introducing the Modified Analytic Hierarchy Process (MAHP).
- 34
- 35 • Integration of supervisory systems in thermal power plants.
- 36
- 37 • Diagnosing problems in generating units.
- 38

39
40
41 **Abstract:** The multicriteria decision-making process is still an open problem, especially when the decision
42 criteria are not numerical or fully outlined. Several numerical, intelligent, or hybrid techniques have been
43 developed, creating contributions to this problem's solution. This paper is another step in this direction. Based
44 on the Modified Analytic Hierarchy Process (MAHP), a methodology for diagnosis and performance analysis
45 is presented for the dispatch ranking of generating units in a thermoelectric plant. The problem is complex
46 because it covers a power plant, where 99 generating units may be dispatched, according to 10 possible
47 evaluation criteria, which should be used together. This article also presents details of the implementation of
48 the sensors necessary to add to the supervisory system existing in the Palmeiras de Goiás Thermal Power
49 Plant.
50

51 **Keywords:** dispatching; modified AHP; power plant operation; supervisory system.
52
53

54 **INTRODUCTION**

55
56 Since the last decade, the combination of a low rainfall rate and insufficient investments by the federal
57 government severely impacted Brazil's energy market. The growing electricity demand has prompted the
58 government to implement rationing plans for companies and the population [1]. Also, contingency plans were
59 drawn up by the governmental institutions responsible for the energetic and electric sectors.
60

2

Campos, R.B.A.; et al.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

As a solution, they consisted of searching for other resources to expand the electrical grid. This fact justifies the incentive to build thermoelectric plants since they are energy sources independent of the water cycle. With this, the Brazilian electrical system becomes more reliable and robust. It is essential to notice that the Brazilian system is one of the few power generation systems globally with its power system based on hydraulic generation. Currently, around 30% of the total Brazilian power generation system comprises thermoelectric plants [2].

These plants need to be available to the National System Operator (ONS) to always produce energy. The ONS is responsible for making the Brazilian system's global optimization, considering economic factors and each plant's reservoir levels. However, it does not consider each generator of the plant's dispatch, observing only the total power. The internal dispatch schedule of each generator is the responsibility of the plant itself. In this way, a new challenge arises for the plants, how to dispatch safely, maintain operational reliability, and preserve the generating units? Thus, an internal dispatch schedule should optimize the power between the generating units [3, 4].

For this to occur, there must be a system capable of performing analyses of the generator units' states available for dispatch, verifying their current operating conditions and their history of maintenance and dispatch. If an inappropriate dispatch is made, it will cause increased costs, increased fuel consumption, and it can cause problems to the environment and stress of the facilities. Thus, a system that can improve the process of diagnosis, predictive maintenance, monitoring, and, mainly, the supervision of the start-up of generators would be extremely desirable for all thermal power plants and thermal systems [5].

Then, to mitigate these problems and contribute to a safer operation, this paper presents a computational tool that assists the operator in establishing an order in which generation unit should be dispatched and at what level this dispatch should occur. This tool goes beyond the units' scheduling because it produces some diagnostics of the generating units' performance, computed by several analyses of the generation set. These analyses are based on measurements performed directly and indirectly at various generating units and comparisons with similar generating units.

Based on intelligent systems techniques, this semi-automatic tool works performs its analysis on the operator's demand, which can, before triggering it, according to your will, modify some parameters. This characteristic that allows the modification of parameters makes this tool also used for the generating units' degradation and performance studies.

When triggered, the tool analyzes the supervisory and control system's data and exchanges data with its database. Diagnosis and scheduling occur in some steps that are entirely transparent to the operator and autonomous. Initially, the tool checks the plant generators' current state, investigates of the operation history, and verifies additional information. In possession of the input data, the system verifies the ONS's demand, and through the proposed Modified Analytic Hierarchy Process (MAHP) technique, sorts the dispatch of the units. During this processing, it produces a diagnosis of deviations from the various measurements of each generating unit to itself and an ideal generation unit. Trend curves and tracking measures with deviations are tracked by the tool, and when levels of preset alarms are reached, messages appear on the operator screen.

When the tool makes its results available to the operator, he/she may or may not use them in dispatching the generating units. A log file saves all information for possible future checks.

The tool presented in this article is in operation at the Palmeiras de Goiás Thermal Power Plant in central Brazil, which consists of 99 generating units of 1.8MW and with a demand of 170MW.

This paper is divided into the following sections. Section II shows the system of supervision and control of the generation, where the entire sensing, supervisory, and database structures are presented. Section III is composed of the mathematical strategies used. Section IV presents the computational methodology applied in developing the generating units' diagnostic device and performance analysis. Section V presents a referring case study in a real power plant.

SYSTEM OF SUPERVISION AND CONTROL OF THE GENERATION

At the beginning of the project, it was verified that the existing supervision and control system, installed by the manufacturer of the generating units, had only basic measurements. Most of them relate to the oil consumption in the drive and the power generated at its output. Information and intermediate measures of the generating units practically did not exist.

Thus, a supplementary supervision and control system was developed and incorporated into the existing supervisory system so that the two systems currently operate in an integrated manner.

The supplementary supervision and control system was developed using the Palmeiras de Goiás Thermal Power Plant characteristics. This system consists of sensors, controllers, communication modules, among other essential equipment. It was also necessary to consider the physical and communication characteristics commonly existing in a thermoelectric generation unit. All equipment and meters have been installed to form an industrial network.

This complementary system's objective is to capture all the essential variables for the preparation of the analyses. The more measures are acquired with high integrity, and the better value is the result produced by the system [6].

The system is equipped with some strategies of self-protection and correction of input data. Still, suppose the integrity at the time of acquisition is not maintained and the measurements performed do not represent the current state of the units' elements. In that case, the results can totally disqualify the control strategy, causing power loss and shutdowns.

The most important items of the sensing network are listed below. In addition to the points mentioned above, the database and the supervisory program are essential parts for the control strategy's functioning, which are addressed in this section.

Network Topology

Figure 1 presents the topology of the developed control network. The PLCs of each generator are connected via an ethernet network to a network switch. It also has ethernet communication and Modbus protocol [7], responsible for recording the information in the database and sending it to the supervisory system. Each element presented in this network and illustrated in Figure 1 is detailed in the sections below.

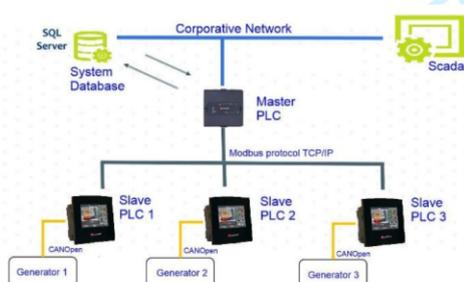


Figure 1. Network topology and main equipment and devices.

Flux Meter

Measurements of generator consumption can be performed through an estimation considering the energy expenditures model of the generator and their mathematical relationships with the power generated. However, to maintain the data's integrity and obtain greater accuracy, the flow meters were installed.

Initially, only 25 generators were connected to the flow meters and the PLC of the Samba line. The Samba PLC is connected to the flow meters and the SAM module, allowing access to other variables of the generating units such as errors, alarms, and momentary indicators.

For technical and economic reasons, the Piusi flow meter, model K400PULSER, was chosen. This equipment's operating principle is based on the aluminum dry contact meter with a Reed Switch-type sensor. The meter has an output signal with the square wave profile, also has a free flow rate of 1 to 30 [L/min], accuracy for plus or minus 0.5%, a weight of 0.51kg, and the dimension is 77mm x 62mm. This meter is installed at the generator fuel system entrance and exit, as shown in Figure 2. Thus, it allows the instantaneous measurement of fuel consumption during the operation of the generating units.

Flux Meter

The PLC must have some specific characteristics: small physical size, large processing capacity, low cost, and a man-machine interface. It should also allow communication with the system of acquisition of measures, visualization of local variables, and return of the control strategy, such as ranking and alerts.

4

Campos, R.B.A.; et al.

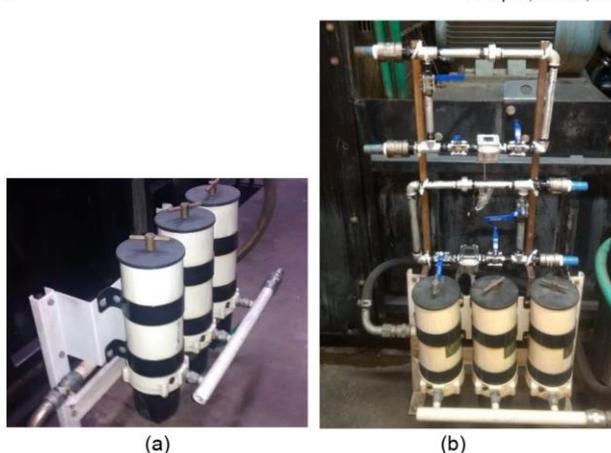


Figure 2. PIUSI fuel meter placement – entrance side: (a) before installation, and (b) after the installation.

The PLC chosen is the SAMBA model, specifically SM35-J-T20 [8], whose manufacturer is Unitronics. Among the CHOSEN PLC features are creating data tables and their export, a library with hundreds of graphics displayed on the touchscreen monitor, and online monitoring of programming logic.

Ethernet Module and CAN Bus Module

The Ethernet module allows you to add a port to the SAMBA PLC and implement TCP/IP communications, such as the MODBUS on TCP, which has the same type of protocol used by the PLC of data concentrator. Some attributes to mention are the transmission speed of 10/100 Mbps and the ability to allow 100m of cables between the module and the switch, an essential feature for installation in a thermal power plant, where the distances are expressive.

The CAN (Controller Area Network) bus protocol allows the exchange of data between microcontrollers and various devices without a host computer's need. It is widely used when it becomes vital to multiplex electrical signals in industrial environments. Protocol actuation occurs when all devices are connected to the same network, and they receive the transmitted message.

The transmitter and receiver with the highest priority receive the message and communicate to the other devices, thus creating a well-structured non-centralized network. This fact is one of the project's main features, as it decentralizes the transmission of data between the Samba PLC and the SAM module. Unitronics manufacture the module chosen, model CAN V100-17-CAN. It is compatible with CAN-Open and UniCAN.

Network Concentrator PLC

Several SAMBA PCLs are connected to the network to acquire data. When the data is accessed individually, the process becomes unproductive, deteriorating one of the project's objectives related to the simultaneous process of data acquisition and analysis. The need to concentrate all these devices on a single piece of equipment led to adopting a network concentrator PLC. It makes the data available for all other equipment and then stores it in the database. This solution aims to simplify the procurement and storage procedure by using only the concentrator PCL. In other words, a single device with Modbus protocol is intended, which should operate independently of the supervisory in the plant, generating autonomy for the solution. The model chosen was Unitronics' USC-B10-B1. The controller's main functionality is remote operation capability, which occurs through a virtual human-machine interface (HMI) installed on a computer.

The network hub PLC requires software for specific program communication functions. For example, the location where the relevant data from the generating units is stored and written to the database. UniLogic software, free and compatible with the PLC defined for this application, was used in this implementation. Figure 3 shows a screen during the programming.



Figure 3. Concentrator PLC programming software.

Network Switch

The network switch allows multiple points of the built network to be concentrated on a single node, making it easier to collect and transmit data. The model chosen was the HP 1820-24G - J9980A, which features excellent network performance, intelligent feature management, and an intuitive interface.

Database

The data obtained by the slave PLCs in the new topology developed and the data resulting from the computational tool need to be archived in a database. In possession of the data, the supervisory can update the main screen with the generators' classification and the specific indicators for each variable of the generating units, alarm screens, graphs with the history of rank, and even as an alternative repository to the analysis program. The data store was generated using the SQL language, which is proper to relational databases.

Tables have a structure and names that can be replicated to all plant generators and those implemented in the computational tool. In this case, the database tables are named GEN_001, GEN_002, and so on. Two table variables have an interesting application, which is E3TimeStamp and FP_Quality. The first indicates the exact moment that the data column was logged into the database. The second shows the connection quality at the time of recording, being 192, the best possible connection quality, and 20 the worst. In this way, it is possible monitoring the integrity of the recorded data.

Supervisory System Software

The supervisory system was designed using the Elipse E3 language. Its purpose is to condense all the information generated by the concentrator PLC and analyze the computational tool, and the necessary data read from the database. There is a concern to present all the data intuitively to the operator and make quick decisions. Figure 4 shows the supervisory system's home screen, where each square represents a plant generator, and each color is used to identify the generator's status. The red color indicates that the generator is not in operation, while the green color indicates the correct operation, and the yellow color suggests that some failure is occurring. The generating units' general ranking is presented in the lower-right corner, dividing between the best and the worst performance. In the lower-left corner, important information is available regarding the operation of the generating units.

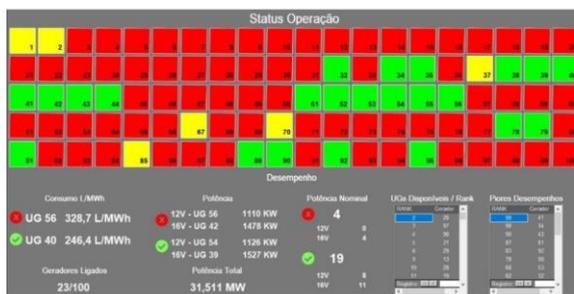


Figure 4. Supervisory system home screen (in Portuguese).

6

Campos, R.B.A.; et al.

PRESENTATION OF THE DEVELOPED NETWORK

This section presents some details of the developed network addressing topics such as linking the database with master CLP, WebServer link with master PLC, slave PLCs, and general network topology.

SQL Execution on the Master PLC Ladder

SQL execution on the master PLC ladder occurs with the control program activating ModBus communication and activating the internal contact that makes the first SQL recording. If the database server is not active, a constant pulse restarts the recording process until it gets a positive response from the recording.

After the 1-second pulse flag is activated, the SQL execution block is updated with the first generator unit's information. Suppose the recording occurs and there is no error in the SQL execution on the database server. In that case, the contact that acts on a new SQL execution block is active but with the second generator unit's information. If a recording error occurs, an error contact is activated to demonstrate this failure. This process repeats for all generating units, restarting the cycle after that, in the first generator unit. Figure 5 shows the process of the SQL execution on the database server pictorially.

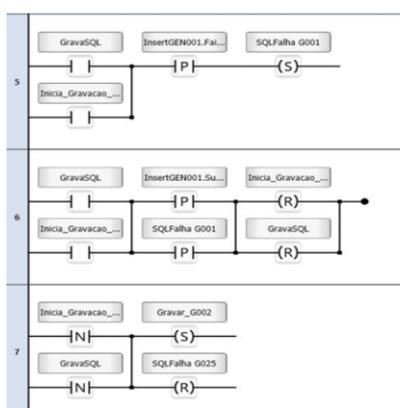


Figure 5. Process of checking for errors in SQL execution on the database server.

Integration between the Master PLC and the Web Server System

The master PLC developed has an integrated WebServer, which allows the user to verify the following information: (a) state of communication between the Master PLC and each of the slave CLPs; (b) state of CAN communication of each of the slave CLPs; (c) SQL recording state in each of the tables in the database; and (d) data from each of the generators, including values involved in the process, inputs and outputs, including alarms.

The Web Server interfaces are written in Portuguese (native language in Brazil); however, some names are written in English due to the operators' use. This fact occurs with the parameter names and alarm names, as shown in Figure 6, where some operator's screens appear. In both screens, the operator can select the parameters to be displayed, and also, he/she can choose which alarms must be activated to each unit (in the case, unit#1).

Integration between Slave PLCs and Network Topology

Slave PLCs are connected to the existing CAN-Open network on each of the generators. The diagram of Figure 7(a) exemplifies this link. In this topology, the slave PLC is inserted into the existing CAN-Open network, making it another node. For this installation, it was necessary to look after the two resistors of 120 ohms at the beginning and end of the network. The CAN-H and CAN-L order was respected at the time of connection.

The flow meters are connected in the first two channels of fast inputs of the PLC, and in the first channel (slot 15 of the input station), the blue wire of the input meter was connected. The second channel (slot 13 of the input station) was connected to the output meter's blue wire. Each of the meters' brown wires was

connected to a 24 VDC power supply's positive pole. The PLC must also be connected to a 24 VDC power supply, with the positive pole in slot 1 and negative in input slot 2.

All equipment involved in this solution has been integrated into the form shown in Figure 7(b). This figure shows the slave nodes, the master PLC, and the computer must be connected to the two HP port switches pictorially. These switches and the master PLC were installed in the Palmeiras de Goias Thermal Power Plant rack. A 24 VDC power supply powered the master PLC.



Figure 6. Examples of operator's screens related to the generator unit #1: (a) parameter screen and (b) alarm screen.

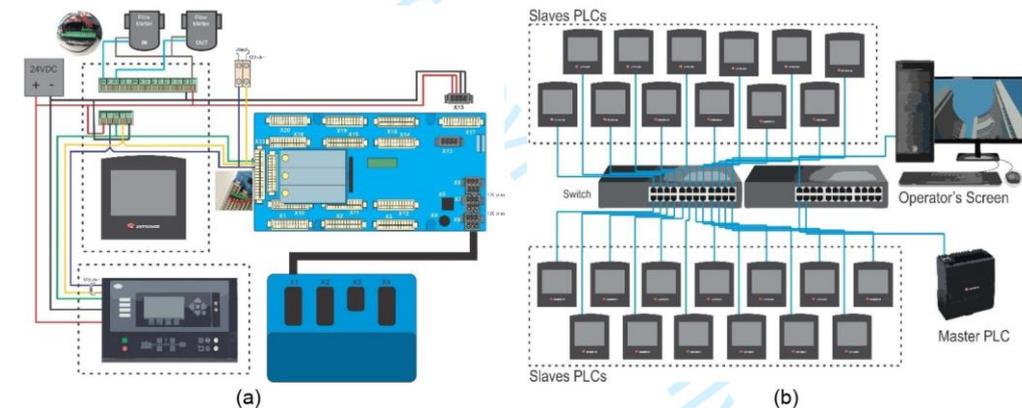


Figure 7. Topology: (a) integration between slave PLCs, and (b) final network installed at the Palmeiras de Goias Thermal Power Plant.

ANALYSIS STRATEGY

The computational strategy of control and analysis developed is based on a hybrid system that merges intelligent systems, mathematical functions, and statistical functions. Among other system functions, this strategy is responsible for creating a ranking and diagnosing the generators. In this system, the variables are obtained through the sensing system, and the computational strategy should allow the manipulation of the parameters according to the operator's decision-making needs.

Variables of a distinct nature model the generation unit. Thus, several analysis profiles appear. One focused on generating the unit's consumption, and the other more focused on the coolant's temperature or even in the hours of operation that the generation unit is working. The latter is also used to balance the weight of each parameter according to the selected profile.

The level of importance between variables is not easily determined analytically. Therefore, one of the proposals of this implementation was to find a mathematical tool that would allow an objective comparison, even if not analytical, between the levels of importance, increasing them according to their respective quantities to construct the ranking of the dispatching of the generating units. Several techniques and methodologies were tested, and the Analytic Hierarchy Process (AHP) [9, 10] was chosen for its flexibility in the processing of data and measurements and the possibility of incorporating information from the operators

8

Campos, R.B.A.; et al.

1 or technical staff of the plant. In this development, the traditional AHP was modified, and a new type of
 2 procedure has been implemented, generating the Modified Analytic Hierarchy Process (MAHP).
 3

4 **Theoretical Foundation**

5
 6 The AHP method can be understood more easily through analogies with the organizational structure of
 7 the human mind. The tool developed by Saaty [9], which received increments posteriorly [11 - 14], has
 8 contributed significantly to the evaluation and classification of countless situations.
 9

10 When faced with many elements, controllable or not, that cover a complex situation, the mind aggregates
 11 them into groups, according to some common properties. The model of this brain function allows repetition
 12 of the process at different hierarchical levels. It is based on common properties to identify the elements.
 13 These are grouped into a new set of properties, creating elements belonging to another higher level until it
 14 reaches a single maximum element, which is identified as the purpose of the decision-making process.

15 The method divides the problem into hierarchical levels clearly by summing up the values of decision
 16 agents. As a result, a global measure is assigned for each of the alternatives, prioritizing them or classifying
 17 them at the end of the procedure.
 18

19 **Foundations of the Proposed Methodology**

20
 21 The procedure used by the Modified AHP (MAHP) method can be divided into two steps: hierarchical
 22 structuring of the decision problem and functioning of the method. The decision-making element must
 23 structure the problem. For this, the criteria are combined according to the various hierarchical levels
 24 necessary, which results in a more faithful representation of the problem. The relevant alternatives are also
 25 studied given each criterion of the lowest hierarchical level. However, this structure should have a high degree
 26 of detail since the criteria applied at each level must be homogeneous and non-redundant [10].

27 The interface is composed of text fields, in which the priorities of each variable are displayed in addition
 28 to the degree of inconsistency. When one tab is chosen, the sliding controls show up on the screen. These
 29 controls are responsible for the parity comparisons for the alternatives for a given criterium or between the
 30 criteria.
 31

32 In the classical AHP, the alternatives are treated by each criterium, creating a matrix where the
 33 alternatives are comparing pair-to-pair. In this case, if n criteria and m alternatives exist, a set of n matrices
 34 with $m \times m$ size are built. After that, there are two possible ways to merge the information of these matrices.
 35 One is combining these n matrices through pair-to-pair comparisons, obtaining a final matrix, and then
 36 computing the final matrix's eigenvector. The other way is computing the eigenvector of each n matrices and
 37 then merging the n eigenvectors by a predefined matrix with each criterium's importance. In both cases, the
 38 number of arithmetical operations for real-time, with many criteria and alternatives, is enormous. Consider
 39 the case treated in this development, where exist 9 criteria and 99 alternatives. Nine matrices 99×99 are built;
 40 imagine the computational effort to combine pair-to-pair and after computing the eigenvectors.
 41

42 In the proposed MAHP, the criteria are treated independently of the alternatives. The criteria are
 43 established, and only a single matrix is created. In our example, a matrix $n \times n$. This matrix uses a similar
 44 Saaty's scale, named fundamental scale, presented in Table 1. The parity comparison is performed using
 45 this scale that ranges from 1 to 9 and their inverse values (1 to 1/9). Each value in Table I has a linguistic
 46 meaning. For instance, if an alternative A has a 'relative importance' than an alternative B, its value of the
 47 comparison is 3. And the comparison between B and A is 1/3. Intermediary values, like 2, 4, 6, and 8, can
 48 also be used.
 49

50 **Table 1.** Fundamental Scale.

51 Value	52 Linguistic Meaning
53 1	54 Same importance
55 1/3 or 3	56 Relative importance
57 1/5 or 5	58 Medium importance
59 1/7 or 7	60 Robust importance
1/9 or 9	Strong importance

Continuing the example, the user may define a different value of the relation between B and A than 1/3. In this case, inconsistency is introduced in the matrix. It is possible, and the degree of consistency (named consistency ratio) is computed as shown in [11]. This degree's recommended acceptable levels are 10%.

1 After constructing the criteria matrix, its eigenvector must be computed. In our case, the power method
2 was used due to the size of the matrix. This method is shown in the Appendix. This eigenvector (1xn size)
3 will use in the final part of the MAHP.
4

5 In the actual implementation, the engineers made the above part of the MAHP in the pre-operation phase.
6 Where some criteria of energy production are defined, and each criterium has an own eigenvector. A set of
7 eigenvectors (1x9 size) will be available to the operator to establish the production ranking according to a
8 given criterium. Also, the developed software presents the value of the consistency ratio during the formation
9 of the criteria matrix.

10 The second part of the MAHP is the construction of the alternative matrix. This matrix has nxm size,
11 containing information related to each (n) criterium for each (m) alternative. In our case, the alternatives are
12 the generating units, and this matrix is automatically composed of information that came from the database
13 each minute. This part of MAHP is performed in the control center.
14

15 The final step of the MAHP is to produce the answer. It is made by the product of the eigenvector (1xn
16 size) resulted from the criteria matrix and the alternative matrix (nxm size), resulting in a vector (1xm size)
17 with values for each alternative. In our case, the final step is performed when the operator needs to increase
18 (or decrease) the generation of energy produced by the power plant. At this moment, the computational
19 program takes the selected eigenvector and multiples for the alternative matrix, composing the final vector
20 with the score for each generating unit. All this process is entirely transparent for the operator. For him/her,
21 it is shown only a list of the best generating units to be operated.
22

23 PRESENTATION OF THE COMPUTATIONAL TOOL

24 After presenting the mathematical technique, which supports this development, this section illustrates
25 how it was integrated into the decision-making process and its relationship with the database. Access to data
26 related to ranking, alarm indicators, and diagnostics of generating units is performed through a computational
27 tool. The Python programming language was used in this implementation by the ease of integration with the
28 SQL language and with the equipment of the developed network. A set of screens for human interfaces (all
29 in Portuguese) were developed for this purpose.
30

31 The set of variables collected by the sensing system is used as a criterion. These 9 variables (criteria)
32 are:
33

- 34 (1) the time that the liquid of the intercooler spends above the average,
- 35 (2) the time that the coolant spends above average,
- 36 (3) the hour-meter,
- 37 (4) numbers of failures,
- 38 (5) the time with the load between 50% and 60%,
- 39 (6) the time with the load between 60% and 73%,
- 40 (7) the time with the load above 73%,
- 41 (8) fuel consumption at start-up, and
- 42 (9) power in kVA generated.

43 Part of the values used in the ranks' composition is constructed from data coming from a table in CSV
44 files, which are composed of historical data.

45 The computation of generator unit scores is automatic and based on repetition cycles that run through
46 generating unit per generating unit and, in each cycle, some steps are completed. Before starting the
47 mentioned steps, it is necessary to check if any generating unit is in operation at the time of computation.
48 This information can be found in the Boolean variables table, i.e., the operating state is monitored by 1
49 (generator unit on) or 0 (generating unit off). If no unit is in operation, calculations are not performed. After
50 the scan is completed, the first step is to access the database to get the tables and instant data from the
51 respective generator. These are saved in vectors to be used in the rest of the algorithm.
52

53 After importing the information from the database, the historical data stored in the CSV table is also
54 imported to vectors and used by the Python software. The variables that are stored in the CSV file are the
55 indexes of the generator units, the average coolant temperature, the time the coolant stays above the average,
56 the average temperature of the intercooler liquid, the accumulated amount of time the intercooler liquid
57 remained above the average, the average oil temperature, the accumulated amount of time the oil stayed
58 above the average, the number of times the generator had to be started-up, the accumulated amount of time
59 the generator stayed with the load below 60%, the accumulated amount of time the generator stayed with
60 the load below of 73% and above 60%, the accumulated amount of time that the generator had the load

10

Campos, R.B.A.; et al.

1 between 100% and 73%, the fuel consumption at the start, the number of samples and, finally, the timestamp
2 at the moment the sampling occurred.
3

4 With the merger of the historical data and database numbers, the criteria variables' new values will be
5 recalculated. The calculation of fuel consumption will start with a vector with 10 empty spaces, in which the
6 last 10 KVA power reads will be stored. If this vector's differentiation has positive values greater than 150, it
7 indicates a start-up, while the negative values indicate a small voltage drop after starting.

8 If the vector has in its first positions power values equivalent to 0, it is possible to find the start-up instant
9 for the generator. Consequently, in possession of these instants, there is the possibility to calculate fuel
10 consumption in this period. After that, the amount of time that the intercooler, coolant, and oil liquids were
11 above average is calculated. First, it is checked whether the temperature is above average; if it is, the
12 difference between the previous and the current time marker is calculated. This difference is added to the
13 value of the variable responsible for storing the time values. This process is like determining how long the
14 generator is in a set of values for the load. One of the existing conditions compares in which range the load
15 variable is located. If it is in one of these ranges, the duration of the time is added.
16

17 Another procedure in this algorithm is the calculation of the number of new start-ups. A new start-up
18 should occur when a generator has its power generation interrupted, often unwantedly, for a time considered
19 short. After this period, start-up occurs, in which it reconnects the generating unit to the system, returning to
20 its normal operating conditions. In this work, the new start-ups of the generating units are expected to happen
21 within a maximum of 10 minutes. Like the algorithm for determining fuel consumption at the start, the process
22 for finding the number of new start-ups will begin by differentiating a 10-position vector. These are filled with
23 the kVA values for each generator. The powers occupy the indexes of this vector's positions, respecting the
24 previously defined conditions, i.e., they can assume values in kVA equal to zero and differentiation greater
25 than 150.
26

27 If the algorithm finds more than two indexes for the conditions mentioned above, the last and the
28 penultimate index will be chosen. They are called the Start Indices. The algorithm also generates a vector
29 with the previous 10-time markers of predominant importance in determining the number of new start-ups.
30 From the Start Indices, the time markers allocated in their respective positions were obtained. Thus, the time
31 variation between the supposed shutdown and restart is defined. Therefore, to be considered as a restart, it
32 is necessary to check if this variation in time is less than or equal to 10 minutes. If it is less than or equal,
33 increase the variable that counts the new start-ups.

34 Throughout the algorithm's processing, the priority vector is updated with values from the parity
35 comparisons in the software interface with the sliders. Before using the vector to determine the final score,
36 some of the vector elements will be multiplied by -1, making them a negative value, better reflect the variables
37 that positively or negatively impact the generator's operation, and avoid extrapolation of values during data
38 processing. So, it is essential to keep in mind that the more negative the score, the worse the generators'
39 performance. This excess of extrapolation can happen when multiplying the priority vector and the
40 parameters of the selected generating units is very high.
41

42 After all these calculations, the rankings will be constructed through the vector multiplication of the priority
43 vector and the generator variables. The classification will update a spreadsheet in the database with the
44 instantaneous values. Another table must also be updated to control each generating unit's minimum,
45 maximum, and current ranks. And the generator variables will be saved again in the CSV file, keeping it
46 continuously updated.
47

48 REAL IMPLEMENTATION AND RESULTS

49 In this section, qualitative analysis for the data originated from 99 generating units located in Palmeiras
50 de Goiás Thermal Power Plant in Brazil's central-western region. Figure 8 shows some of the 99 generating
51 units.
52

53 Details of the Implementation

54 After the total installation of the infrastructure (CLPs, switches, flow meters, cables, and so on), all
55 components were tested and accessed remotely. Everything is fully functioning. For example, in Figure 9,
56 some pictures of this installation for generating unit #25 (named GEN-025) are shown.
57
58
59
60



Figure 8. Part of the 99 generating units of the Palmeiras de Goiás Thermal Power Plant.

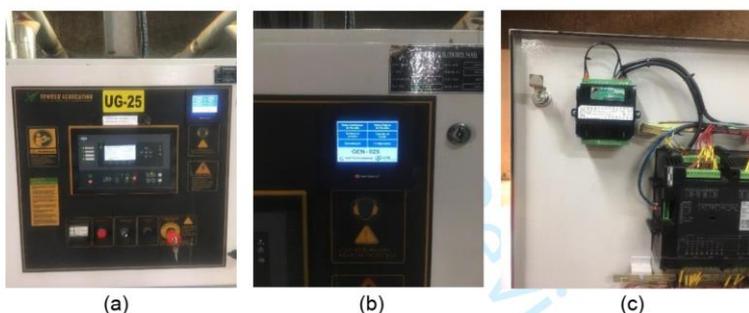


Figure 9. PLC operating in the panel of the generating unit #25: (a) general panel of unit #25, (b) new display included in this development, and (c) connections of the slave CLP.

The concentrator PLC was installed next to the panel in the control room. Its communication functions in the industrial network were confirmed based on access to the PLC's web browser. Figure 10 shows a picture of the PLC hub web browser access.

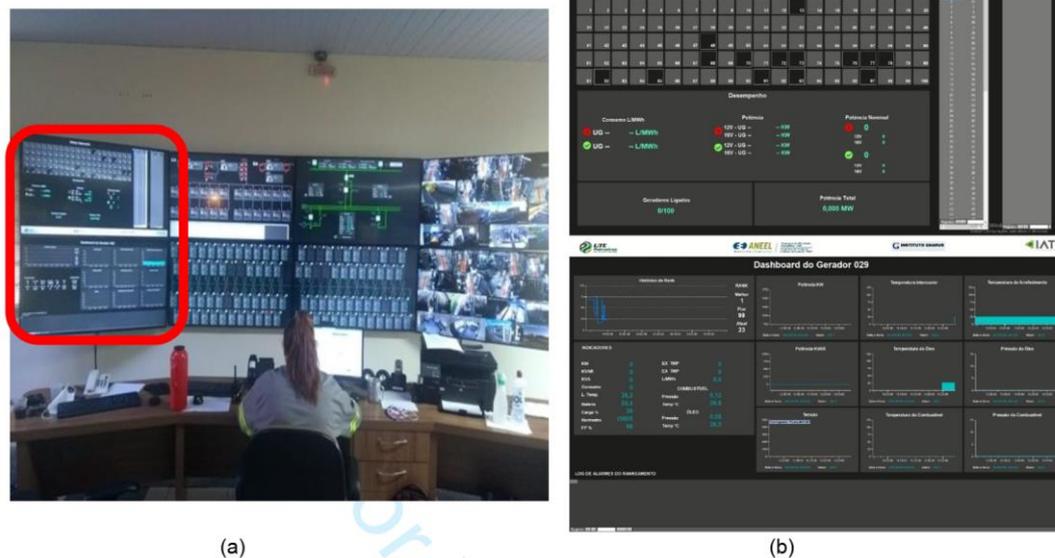


Figure 10. Picture of a PLC hub web browser access screen of unit #25.

A reformulation of the supervisory system's screen system was necessary, including the visual adaptation of the home screen to the visual standards of the main supervisory of Palmeiras de Goiás Thermal Power Plant. A new adaptive screen has been developed, displayed on the second monitor, which shows each selected generator's information on the main screen, including graphs with historical values. Figure 11(a) shows all the final supervisory system screens, the two screens on the left are the new supervisory system screens. These screens are presented in detail in Figure 11(b).

12

Campos, R.B.A.; et al.



(a)

(b)

Figure 11. Supervisory system: (a) screens installed, and (b) new supervisory screens in the control room of Palmeiras de Goiás Thermal Power Plant.

Technical Results of the Implementation

The generating units were classified and ranked within three different scenarios. The three scenarios used the proposed MAHP to determine the generating units' classification, with only the weights given for each variable different from each one. The first scenario proposes that all variables have the same weight. The second scenario considers prioritizing the variable that indicates the amount of time with the load above 73%. Finally, the third scenario has fuel consumption with the highest weight. The criteria matrix for the first scenario has the value 1 in all positions of the matrix. In the second scenario, line 7 presents the value 9, and column 7 shows the value 1/9. In position (7,7), the value is 1. Because the criterium "the amount of time with the load above 73%" is the 7th criterium. All other elements of the matrix are like 1. Finally, in the third scenario, the same occurs in line and column 8, related to the "fuel consumption." Table 2 shows the eigenvector produced in each test.

Table 2. Eigenvector Produced in each Test.

Criteria	First Scenario	Second Scenario	Third Scenario
(1)	-0.1	-0.0556	-0,0556
(2)	-0.1	-0.0556	-0,0556
(3)	-0.1	-0.0556	-0,0556
(4)	-0.1	-0.0556	-0,0556
(5)	-0.1	-0.0556	-0,0556
(6)	-0.1	-0.0556	-0,0556
(7)	-0.1	0,5	-0,0556
(8)	-0.1	-0,0556	0.5
(9)	-0.1	-0,0556	-0,0556

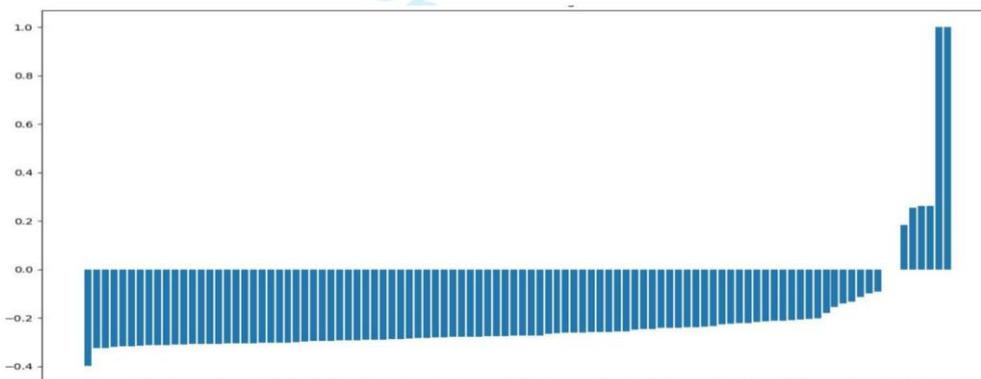
Table 3 presents the results for the three scenarios showing the best five generating units. The operator can access a complete list of results. Figure 12 shows the completed list of results for the first scenario, with each generating unit's score. It is possible to observe the result of the best unit, number #82, has almost the same score as the second-place unit, number #83; while the third, fourth, and fifth position units, number #46, #66, and #7, respectively, have lower scores. In this scenario, the worst unit to start is the number #84. The operator can also demand to show this figure before he/she takes the necessary action.

1
2 **Table 3.** Eigenvector Produced in each Test.

3	Ranking	First Scenario	Second Scenario	Third Scenario
4	1 st	82	82	83
5	2 nd	83	83	82
6	3 rd	46	46	46
7	4 th	66	66	66
8	5 th	7	7	7
9	⋮	⋮	⋮	⋮
10	Worst	84	89	84

11
12
13 Other screens were also produced to give support to the operator to take his/her decision. Each
14 generating unit has its own window with all available information. Observing this window, the operator can
15 check all the generator variables to determine a possible problem or to verify an alarm. Figure 13 shows the
16 information related to generating unit #52. In the upper-left part of the window, the ranking history of this
17 generator is shown. Also, the screen data indicates that the processed data was correctly recorded in the
18 database and that the supervisor system can interpret the variables coming from the data concentrator PLC.

19 Also, this individual screen for each generating unit verifies the reasons for poor scores and bad positions
20 in the ranking. Checking these screens, the operator can observe that some machines could be running with
21 higher consumption than the other generators. With this information, the operator can identify and mitigate
22 any unsatisfactory state for the generators.
23



40 **Figure 12.** Scores of all generating units for the first scenario.



54 **Figure 13.** Dashboard of the unit #52 (in Portuguese).

55 CONCLUSIONS

56
57 The paper presents a control and monitoring solution for a thermoelectric plant. The solution facilitates
58 the diagnosis of the generating units, supports their start-up, and monitors the variables pertinent to the
59 generators' operation.

60 The procedure used was based on implementing more sensors to improve the measures' accuracy and
integrate the existing system used on the generator units to the newly developed supervisory. A data

14

Campos, R.B.A.; et al.

1 transmission network was created, allowing the storage of variables in the database. Besides, it was
 2 necessary to create a computational tool capable of performing all possible calculations with the data
 3 presented.
 4

5 The developed structure allows checking in real-time the conditions for the 99 generators of a
 6 thermoelectric plant. Thus, it was possible to perform the ranking of these machines through variables
 7 representative of the operation. For that, an approach, named Modified Analytic Hierarchy Process (MAHP),
 8 was proposed and implemented to treat a large number of variables that came from the 99 generating units
 9 and combine with several scenarios of production of energy. The MAHP is fast enough to provide a ranking
 10 of generating units in real-time. Furthermore, it enabled the operator to view the variables of interest in an
 11 integrated supervisor system.
 12

13 This set of solutions brought more quickness to the process of repairing generators. It also facilitates
 14 identifying possible problems in the process, increases reliability, and brings more safety to the plant's
 15 operation. In this way, it allows quickly and reliably that all variables are continuously monitored. The system
 16 is currently operating at the Palmeiras de Goias Thermal Power Plant.
 17

18 APPENDIX

19 After the construction of the criteria matrix (nxn size), for n criteria. It is necessary to compute the
 20 eigenvector of this matrix. Many methods could be used. In this development, the Power Method was
 21 implemented due to its good performance and fast convergence or the typical parameters used in this
 22 problem.
 23

24 Let us a matrix A (nxn size), the criteria matrix, and an auxiliary vector b (1xn size). Let us also a subscript
 25 k being an iteration indicator. First, the process initializes the vector b with random values, but usually, each
 26 element is filled with the value 1/n. Equation (1) shows how to compute the next iteration of the vector b.
 27 First, multiply A by b_k and then divide the result by the module of the same result previously obtained. The
 28 process is repeated until the error's value is within a predetermined threshold or the maximum number of
 29 iterations has reached.
 30

$$31 \quad b_{k+1} = \frac{(A * b_k)}{\|A * b_k\|} \quad (1)$$

32
 33
 34
 35 **Funding:** This research was funded by CEPASA Power Plant, Hidrotermica Group, inside the ANEEL R&D projects.

36 **Acknowledgments:** The authors would like to express their thanks to CNPq, and CAPES.

37 **Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.
 38

39 REFERENCES

- 40
 41 1. L. C. Siebert, A. R. Aoki, G. Lambert-Torres, N. Lambert-de-Andrade, and N. G. Paterakis, "An Agent-Based
 42 Approach for the Planning of Distribution Grids as a Socio-Technical System," *Energies*, vol. 13, paper 4837, 2020,
 43 10.3390/en13184837.
 44 2. ONS – National Operator of the System, Monthly Operating Program Report, January 2021, Available online:
 45 http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Informe_PMO_202101_REV2.pdf (accessed on 27
 46 January 2021).
 47 3. Y. Teng, P. Sun, O. Leng, Z. Chen and G. Zhou, "Optimal Operation Strategy for Combined Heat and Power
 48 System Based on Solid Electric Thermal Storage Boiler and Thermal Inertia," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 180761-
 49 180770, 2019, 10.1109/ACCESS.2019.2958877.
 50 4. S. Hussain, M. Al-Hitmi, S. Khaliq, A. Hussain, and M. Asghar Saqib, "Implementation and Comparison of Particle
 51 Swarm Optimization and Genetic Algorithm Techniques in Combined Economic Emission Dispatch of an
 52 Independent Power Plant," *Energies*, vol 12, no. 11, paper 2037, 2019, 10.3390/en12112037.
 53 5. C. Wei, T. Hofman, E. Ilhan Caarls, and R. van Iperen, "Integrated Energy and Thermal Management for Electrified
 54 Powertrains," *Energies*, vol. 12, no. 11, paper 2058, 2019, 10.3390/en12112058.
 55 6. Z. Deng and J. Wang, "Multi-Sensor Data Fusion Based on Improved Analytic Hierarchy Process," *IEEE Access*,
 56 vol. 8, pp. 9875-9895, 2020, 10.1109/ACCESS.2020.2964729.
 57 7. Modbus, Application protocol specification, January 2020, Available online:
 58 https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf (accessed on 17 January 2020).
 59 8. SambaTM OPLCTM SM35-J-T20, Technical Specifications, 2014. Available online: [https://www.dakol.com.br/wp-](https://www.dakol.com.br/wp-content/uploads/files/SM35-J-T20-Especificacao-Tecnica.pdf)
 60 [content/uploads/files/SM35-J-T20-Especificacao-Tecnica.pdf](https://www.dakol.com.br/wp-content/uploads/files/SM35-J-T20-Especificacao-Tecnica.pdf) (accessed on 31 March 2020).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

9. T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1980.
10. T. L. Saaty, *Mathematical Principles of Decision Making (Principia Mathematica Decernendi)*, Pittsburgh, PA, USA: RWS Publications, 2009.
11. G. Lambert-Torres, C. I. de Almeida Costa, M. C. B. Neto, G. C. C. de Andrade and C. H. V. de Moraes, "Decision-making using a Paraconsistent analytic hierarchy process," 5th International Conference on the European Electricity Market, Lisboa, May 2008, pp. 1-6, 10.1109/EEM.2008.4579085.
12. G. C. C. de Andrade, *A PHAP Application in Electrical Systems Planning*, Master's Thesis, Itajuba Federal University, Itajuba, Brazil, 2009 (in Portuguese).
13. A. Emrouznejad and W. Ho, *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*, London, UK: Chapman and Hall/CRC, 2017.
14. K. Xu and J. Xu, "A Direct Consistency Improvement Method for the Probability-Hesitant Analytic Hierarchy Process," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9445-9458, 2019, 10.1109/ACCESS.2019.2891286.



© 2018 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).