



Giselle Figueiredo Morabito

**Proposição de indicadores e métricas para
avaliar e mensurar a eficiência das
subestações de um microgrid**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio como
requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Urbana e Ambiental

Orientador: Prof. Rodrigo Flora Calili

Rio de Janeiro

Mai de 2017



Giselle Figueiredo Morabito

**Proposição de indicadores e métricas para
avaliar e mensurar a eficiência das
subestações de um microgrid**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Rodrigo Flora Calili

Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia, PUC-Rio

Prof. Daniel Ramos Louzada

Programa de Pós-graduação em Metrologia, PUC-Rio

Márcio Egydio da Silva Rondon

GE Global Research

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de maio de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Giselle Figueiredo Morabito

Graduada em Engenharia pela PUC-Rio, em 2008. MBA em Gestão de Projetos pela IBMEC em 2010, integra o desenvolvimento e gestão de projetos de energia, sustentabilidade de uma empresa de entretenimento. Adicionalmente, desde 2009, atua no mercado de energia elétrica.

Ficha Catalográfica

Morabito, Giselle

Proposição de indicadores e métricas para avaliar e mensurar a eficiência das subestações de um microgrid. Giselle Morabito; orientador: Rodrigo Flor Calili; Maio – 2017.

116 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Engenharia urbana e ambiental – Teses. 3. Energia. 4. Eficiência Energética. 5. *Microgrid*. 6. Preventório. I. Calili, Rodrigo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Agradeço a Deus e aos meus Guias Espirituais que trilharam e abençoaram meus caminhos até aqui. Ao meu pai Sergio Morabito, pelo amor incondicional, por acreditar mais em mim do que eu mesma, por enxergar o melhor de mim e me incentivar perante aos desafios a fazer mais e melhor. A minha mãe Lucia Figueiredo Morabito que com calma e tranquilidade me ajudou a contornar alguns momentos difíceis.

Aos meus avós maternos Ari Bezerra e Valdete Figueiredo Bezerra que são a base de tudo que sou hoje, meu cerne e meu orgulho. Meus avós paternos *in memoriam*, minha essência italiana: Orazio Morabito, Philomena Imaculada Martorelli Morabito, Eugênio Morabito e Arlinda Trancoso Soares, o verdadeiro anjo da minha vida, que onde quer que esteja zela por mim.

Minhas mais que tias, minhas amadas e super amigas: Edilene Figueiredo, Elisabete Figueiredo e Lindaci Figueiredo. Ao meu tio Rogério Fonseca pela conversas e trocas profissionais e pelo apoio de sempre. Aos meus primos Gabriel Fonseca, Rodrigo Fonseca, Yasmin Figueiredo, Rogério Figueiredo, Fernanda Figueredo, Italo Figueiredo pelas companhias anti-stress durante os churrascos em família.

Meu irmão Serginho Morabito minha cunhada Andrea Sousa e meus sobrinhos Allan Morabito e Junior Morabito que pacientemente entenderam a minha ausência por diversas vezes.

As minhas melhores amigas que representam quase um casamento para mim, pois estão comigo na alegria e na tristeza, na saúde e na doença e não me abandonam nunca (em ordem alfabética): Carol Goloni, Carla Leone, Erica Monteiro, Fabiana Abbade, Maira Montiel, Milene Siciliano, Nadiane Martins, Nara Guimarães, Renata Costa, Thais Oliveira. E os meninos, é claro: Marcel Ribeiro, meu primo, Marcelo Moraes, Henrique Junger, Claudio Pimentel, Valdivino Junior, Leandro Pires, Marcel Dantas e Felipe Andrés.

A minha Terapeuta Soraya Tebet da Cruz, pelo excelente trabalho durante esses anos todos!

Ao meu, para sempre, engenheiro número 1 Iuri Lippi, que sempre me motivou e me deu forças nos momentos difíceis para continuar. Para os amigos do

trabalho pela companhia e motivação diária: Monica Vasconcellos, Roberto Garcia. Um muito obrigada!

À amiga que fiz no Mestrado: Marcela Cristo. E aos amigos que fiz pela vida, obrigada pela paciência e pela torcida por esperarem por mim todo esse tempo: Maria das Graças, Wellington, Marco Silva, Livia França, Camila Dias, Mila Dafree, Nelson Guimarães, Dubeg, Renata Guimarães, Natália Magalhães, Mariana Rocha, Paloma Andrade, Bianca Renha, Suyin Junger, Flavia Melas, Francis Asevedo, Leandro Lira, Bernardo Cunha.

Ao meu grupo de amigos da turma de Trainees da Light, apesar de não nos vermos como desejamos, a amizade permanece viva ainda que virtualmente, vocês me ajudaram a aliviar o stress do dia-a-dia através de nossas conversas diárias.

Ao meu querido Flamengo que me proporcionou muitas felicidades nesse período difícil e conturbado da vida.

Aos Professores da Universidade Técnica de Braunschweig pela troca de experiências profissionais e cultural. Aos Professores do Departamento de Engenharia Civil por toda a dedicação e comprometimento.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Flora Calili, pela orientação e pelo apoio, em todos os sentidos, ao longo do período de realização deste trabalho.

Resumo

Morabito, Giselle Figueiredo; Calili, Rodrigo Flora (Orientador). **Proposição de indicadores e métricas para avaliar e mensurar a eficiência das subestações de um microgrid.** Rio de Janeiro, 2017. 116p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Objetivo dessa dissertação é propor um conjunto de indicadores e métricas para avaliar e mensurar a eficiência das subestações de um *microgrid*. No conceito institucional o qual a pesquisa se insere, considera-se que o esforço proporcionará a empresa em questão avaliar a eficiência e inteligência das suas subestações em seu *microgrid*. A pesquisa pode ser considerada aplicada, descritiva e metodológica. Quanto aos meios de investigação, foi usado o método de construção de indicadores para avaliação da eficiência energética aliada a dois métodos de apoio à decisão: AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para definição dos pesos dos critérios classificatórios e a técnica TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) para hierarquização dos indicadores propostos por categoria dos requisitos de eficiência energética e inteligência, a partir dos graus atribuídos pelos especialistas. Destacam-se como resultados: a ferramenta de seleção e classificação de subestações e um conjunto consistente de indicadores de eficiência e inteligência. Como resultados, espera-se obter a melhoria da eficiência das subestações de um *microgrid* e poder acompanhar o processo de melhoria contínua.

Palavras-chave

Eficiência Energética; redes elétricas inteligentes; *Microgrid*; indicadores e métricas; AHP-TOPSIS

Extended Abstract

Morabito, Giselle Figueiredo; Calili, Rodrigo Flora (Advisor). **Proposal of indicators and metrics to evaluate and quantify the efficiency of microgrid electric substations**. Rio de Janeiro, 2017. 116p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this study is to propose a set of indicators and metrics to evaluate and measure the efficiency and intelligence on microgrid electric substations. It was used a methodology to stablish indicators for evaluating the energy efficiency combined with two decision support methods: AHP (Analytic Hierarchy Process) for definition the importance of criteria selected, and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal of Solution) to classify the most efficiency and intelligent substation. As a result, it is expected to obtain the improvement of efficiency of power substations of a microgrid and follow the process of continuous improvement of their intelligence.

Geller (2004) emphasizes the importance to adopt energy efficiency measures, through the use of alternative energy resources. The author states that the numbness in the current energy sources will result in irreparable harm to the environment, generating major climate change .It is necessary consider an innovative energy management model capable for meeting the challenges to meet the new standards of consumption, combining environmental, social and economic aspects . Smart Grids (SG) are able to incorporate information and communication technology in all aspects of generating electricity, allowing the entrance of new suppliers in the energy network, generating a better management of distribution and consumption, optimizing efficiency, minimizing costs, and diminishing environmental impacts.

Currently, the SG is in development stage, with large spaces for research and development of enhancements and applications. Countries like USA, Japan and other European Community are planning to implement this novel grid till mid-2020 to 2030 Rivera (2013).

In Brazil, this trend follows a different reality, due to economic crisis and regulatory aspects. In this country, most of smart grid projects are in development

research and they are in slower progress status when compared to developed countries Rivera (2013).

The implementation of a smart grid, with various alternatives of energy sources, provides better management and optimal use of each alternative. So, the necessity of managing the power distribution network more efficiently as possible increases Caneppele (2011).

Microgrid is a concept widely disseminated in the literature. It can be defined as an intelligent electrical network applied in a smaller scale. As example we can cite: large commercial centers, a large industries; a large condominiums, a neighborhoods, etc.

The aim of this article is to propose a set of indicators and metrics to evaluate and measure the efficiency and intelligence on microgrid electric substations.

The methodology proposed will support mathematically the decision maker in the energy management of a huge television studio, which can be considered a microgrid.

The research methodology followed a procedural structure analysis based on literature review focused on central themes of research: (i) substations (ii) energy efficiency (iii) microgrids (iv) multiple criteria decision methods (MCDM), trying to select the best methods to be considered in the context of energy efficiency of substations in microgrids.

The model used in this work considered a hybrid multi-criteria decision-making (MCDM) method, putting together two methods widely used in literature: AHP (Analytic Hierarchy Process), and (TOPSIS Technique for Order Preference by Similarity to Ideal of Solution).

AHP method was proposed by Saaty (2000). It is a multi-criteria support tool for decision making, which reveals the wide number of applications in current literature. Through peer comparisons, it is possible to perform the trials because the priorities calculated by the method will capture both the subjective measures, and the depth the particular criterion (or alternative) n relation to another.

The second method used will be the TOPSIS. The technique is used to examine the performance of options by similarity to ideal solution. It was introduced by Hwang and Yoon Hwang (1981), in 1981, since then, it has been

applied by researchers from different areas. With this technique, the best alternative would be the one closest to the ideal solution (positive ideal solution - PIS), and more distant from the unideal solution (negative ideal solution - NIS). The positive solution is made up of all the best attainable values for each criterion. However, the ideal solution, shows the worst values attainable for each decision criterion .

Using the two techniques AHP and TOPSIS was developed a model of selection and classification of indicators and metrics to evaluate the efficiency of the substations on a microgrid attachments. During the construction of this model were made interviews and meetings with some managers and specialists in the area, especially engineers, to capture their perceptions on the issues.

A case of study focusing on the application of the data measured in the field, to validate the proposed model. The research in question is related to a specific issue of a microgrid, however, the method developed can cover other microgrids, aside from smart grids.

Summarizing, the model covers six main steps: (i) analysis of the objectives and expected results of an efficient and intelligent power grid; (ii) the definition of the types of indicators; (iii) the definition of criteria for selection and classification of indicators; (iv) the proposition of indicators; (v) application of AHP method for weighting of criteria on the selection and classification of Network Intelligence and proposed Efficiency indicators; and (vi) use of TOPSIS method to the final ranking of the proposed indicators and related monitoring and evaluation metrics of a microgrid attachments.

After the research, the main results are displayed: (i) a model of selection and ranking indicators and metrics to evaluate the efficiency and intelligence on microgrid substations was created; and (ii) a consistent set of indicators and metrics for monitoring and evaluation of the efficiency of a microgrid electric substations was developed.

Using the modelling previously described via a multi-criteria decision-making (MCDM), four electric substations were evaluated in a microgrid (a huge television studio in Brazil). It was observed that the substation that obtained the best position in the final ranking is that one which has the best value for all criteria used in the model, and considered by all engineers and specialists the more efficient and intelligent.

It is important to mention this research reached the proposed objective. And, a set of indicators and metrics to evaluate and measure the efficiency and intelligence on microgrid electric substations was proposed.

In the case studied presented in this study, the network is not yet fully intelligent, it is not possible to have the measurement of all parameters of efficiency and intelligence needed for a better evaluation. As the network becomes more intelligent, new parameters can be measured and added to the project (being incorporated to the model), being necessary to review the indicator weights used. Conclusively, the project is not static it needs to be revisited as new parameters are added to the microgrid.

Keywords

Energy efficiency; Smart grid; Microgrid; Indicators and metrics; AHP-TOPSIS.

Sumário

1 Introdução	17
1.1 Definição do Problema	18
1.2 Objetivos: Geral e Específico	19
1.3 Motivações para o trabalho	20
1.4 Metodologia	20
1.5 Delimitação da Pesquisa	21
1.6 Organização da dissertação	23
2 Subestações	24
2.1 Conceitos gerais	24
2.2 Macroclassificações de subestações – SEs	25
2.3 Classificação das subestações	26
2.3.1 Em função do sistema elétrico	26
2.3.2 Modo de instalação dos equipamentos em relação ao meio ambiente	26
2.3.3 Quanto ao nível de tensão	27
2.3.4 Quanto à função ao sistema elétrico global	27
2.3.5 Quanto ao tipo de instalação	28
2.3.6 Quanto ao tipo construtivo de equipamentos	28
2.3.7 Quanto à modalidade de comando	29
2.4 Principais equipamentos das subestações	29
3 Eficiência Energética	32
3.1 O conceito de eficiência energética	32
3.2 Causas da ineficiência energética	32
3.3 Definição de eficiência energética ao longo dos anos	33
3.4 Políticas brasileiras de eficiência energética	35
3.5 A eficiência energética no âmbito do planejamento energético	37
3.5.1 Aspectos Econômicos	38
3.5.2 Aspectos Ambientais	39
3.5.3 Aspectos Sociais	39
3.5.4 Segurança Estratégica	40
3.6 Sistema de tarifação	40
3.6.1 Classificação dos consumidores	41
3.6.2 Composição tarifária	42
3.7 Sistema de gestão de energia	48
3.8 Indicadores de eficiência energética	53
3.8.1 Fator de potência	55
3.8.2 Fator de carga	56
3.8.3 Fator de demanda	57
3.8.4 Demanda	57
3.8.5 Indicadores de Qualidade	58
3.9 Smart grid	59
3.9.1 Smart Microgrid	61
3.9.2 Indicadores de inteligência	63

4 Metodologia	65
4.1 Levantamento de Dados	65
4.2 Definição de indicadores	66
4.3 Métodos multicritério de apoio à decisão	69
4.3.1 Métodos Utilizados	69
4.3.2. Processo Analítico Hierárquico (AHP)	70
4.3.3 Técnica para avaliar o desempenho de alternativas pela similaridade com a solução ideal (TOPSIS)	71
4.4 Considerações finais sobre o capítulo	72
5 Resultados	74
5.1 Construção da matriz de indicadores	75
5.1.1 Avaliação do objetivo da avaliação e resultados esperados	76
5.1.2 Definição dos tipos de indicadores	76
5.1.3 Definição dos critérios de seleção dos indicadores	77
5.2 Aplicação do método AHP para definição dos pesos dos critérios classificatórios	77
5.3 Aplicação da técnica TOPSIS para hierarquização final dos indicadores selecionados por categoria de requisitos legais	79
5.4 Resultado final da hierarquização dos indicadores	82
5.5 Considerações finais sobre o capítulo	83
6 Conclusão	84
7 Referências bibliográficas	86
Anexos	93
Anexo 1 – Descrição do método analítico hierárquico – AHP	93
Anexo 2 – Descrição da técnica para avaliar o desempenho de alternativas pela similaridade com a solução ideal – TOPSIS	101
Apêndice	104
Apêndice 1 – Coleta de Dados em campo	104

Lista de Tabelas

Tabela 1: Indicadores eliminatórios de qualidade: DIC, FIC e DMIC.	67
Tabela 2: Pesos Obtidos para cada um dos critérios classificatórios.	78
Tabela 3: Descrição dos indicadores	79
Tabela 4: Hierarquização dos indicadores.	80
Tabela 5: Soluções ideais PIS e NIS para cada critério.	81
Tabela 6: Distâncias euclidianas (positivas e negativas) dos indicadores.	81
Tabela 7: Resultados da hierarquização dos indicadores desta categoria, com o suporte da técnica TOPSIS.	81
Tabela 8: Resultado do somatório	82
Tabela 9: Cálculo dos ξ das Subestações	82
Tabela 10: Ranking das subestações	83

Lista de Quadros

Quadro 1: Definições de Eficiência Energética.	34
Quadro 2: Receita de uma distribuidora de energia elétrica.	43
Quadro 3: Composição tarifária de energia elétrica.	47
Quadro 4: Vantagens e desvantagens da implementação de um Sistema de Gestão Energética (SGE) conforme a ISO 50001.	51

Lista de Figuras

Figura 1: Mapa mental da pesquisa.	21
Figura 2: Esquema de uma subestação.	30
Figura 3: Modelo de Sistema de Gestão de Energia da ISO 50001:2011.	50
Figura 4: Representação conceitual de desempenho energético.	52
Figura 5: Analisador Portátil Power Net P600 ligado em rede trifásica junto a entrada de energia na subestação 1.	66
Figura 6: Apresentação do Microgrid da Pesquisa.	74
Figura 7: Mapa das Subestações dos Estúdios Globo.	75

Lista de abreviaturas e siglas

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CBEE	Companhia Brasileira de Energia Elétrica
CEE	Comissão Estadual de Energia
Celf	Centrais Elétricas Fluminenses S.A.
CRAS	Centro de Referência de Assistência Social
DIC	Duração de Interrupção por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora
ELETOBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras
FIC	Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
GLD	Gerenciamento pelo lado da demanda
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômicos
PEE	Programa de Eficiência Energética de Distribuidoras
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROPEE	Procedimentos do Programa de Eficiência Energética
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
ROL	Receita Operacional Líquida
SIPRI	<i>Stockholm International Peace Research Institute</i>
TSEE	Tarifa Social de Energia Elétrica

Introdução

No atual mundo globalizado, o homem e a sociedade que o cerca evoluem e crescem de maneira exponencial. Para que as necessidades da sociedade moderna sejam atendidas, é necessário o crescimento da produção de bens e serviços, que carece da energia elétrica como insumo fundamental. No entanto, esta relação cada vez maior de dependência de energia elétrica imprime uma preocupação no que diz respeito a atual disposição e capacidade de produção em acompanhar o ritmo crescente e acelerado de demanda de energia (SILVA, 2012).

Geller (2003) enfatiza a importância em se adotar medidas de eficiência energética diversificadas, através da busca por fontes de energias alternativas aos atuais padrões adotados no mundo inteiro. Este autor afirma que a dormência nas metodologias atuais de suprimento de energia, baseada em combustíveis fósseis, acarretará em danos irreparáveis ao meio ambiente, gerando grandes alterações climáticas.

A partir deste conceito, surge a necessidade de aplicar um modelo inovador de gestão energética capaz de responder aos desafios de atender aos novos padrões de consumo, aliando aspectos ambientais, sociais e econômicos (GELLER, 2003). Surge então o modelo de *Smart Grids* (SG) ou Redes Elétricas Inteligentes (REI), criado por Amin e Wollemborg (2005) capaz de incorporar tecnologia de informação e comunicação em todos os aspectos da geração de eletricidade, permitindo a entrada de novos fornecedores na rede energética (incluindo energias renováveis), gerando uma melhor gestão de distribuição e consumo, otimizando a eficiência e minimizando custos e impactos ambientais (EL-HAWARY, 2014).

Atualmente, REIs estão em estágio de desenvolvimento, havendo grandes espaços para pesquisa e desenvolvimento de melhorias e aplicações. Países como EUA, Japão e outros pertencentes à Comunidade Europeia apontam planos de conclusão de implantação total ou parcial dos SGs em meados de 2020 a 2030 (RIVERA, et al. 2013).

No Brasil, essa tendência segue por uma realidade diferente (devido às medidas econômicas em resposta à crise mundial), num estado de evolução mais lento se comparada aos demais países, os quais já vêm desenvolvendo seus projetos há mais tempo (RIVERA et al., 2013). A implantação dos SG no Brasil ainda depende de mais volume de investimentos e iniciativas, os quais, concentrados no tempo, viabilizarão o desenvolvimento de novas tecnologias e possibilidade de aplicações em larga escala, incentivando a demanda e gerando aperfeiçoamento da cadeia de bens e serviços, com base no ciclo virtuoso de desenvolvimento de acordo com Hirschman (KRUGMAN, 2013).

Pensando em planejamento empresarial, a implementação de um SG, com diversas alternativas de entrada de energia aplicáveis, propicia uma melhor gestão e um aproveitamento otimizado de cada modal (CEMIG, 2012).

A partir deste problema, surge a necessidade de uma ferramenta que auxilie o gestor a administrar a rede de distribuição de energia de maneira mais eficiente possível (CANEPPELE, 2011). Na realidade, neste trabalho será elaborado um modelo de apoio à tomada de decisão, que embasará a tomada de decisão na gestão energética de um modelo de SG aplicado em um estúdio de televisão de grande porte.

De modo geral, percebe-se uma mudança na política energética e a necessidade de não somente investir em energias renováveis, mas também no processo de gerenciamento dos recursos energéticos, visando um maior aproveitamento e distribuição de energia, reduzindo custos e, com isso possibilitando futuros investimentos tais como o estudo de caso retratado nesta dissertação.

1.1

Definição do Problema

Em seu histórico de funcionamento, a empresa em questão nunca apresentou uma ocorrência de interrupção de operação, sendo esta uma de suas missões como empreendimento de grande cunho e relevância nacional. Identificada a complexidade deste problema de não interrupção, percebe-se a dificuldade em aprimorar a eficiência na gestão energética da empresa,

prevenindo-se de fatores externos em meio a uma crescente demanda. Com isso, nota-se a necessidade de implementar uma metodologia de avaliação capaz de combinar diversas variáveis à diferentes cenários, permitindo um maior embasamento estratégico na tomada de decisão.

Com isso surge a seguinte questão de pesquisa:

“Que indicadores e respectivas métricas devem ser considerados para monitorar e avaliar a eficiência energética e inteligência das subestações de um *Microgrid*?”

1.2

Objetivos: Geral e Específico

Na realidade de uma empresa de grande porte, a energia é um insumo fundamental para a produção. Neste contexto, qualquer intermitência ou queda de qualidade no fornecimento pode representar perdas de produtividade e custo. Com isso, o objetivo geral desta dissertação é propor indicadores e respectivas métricas para redução de perdas por meio da verificação da qualidade de energia, eficiência energética e inteligência da rede em subestações. Em termos específicos, a dissertação busca:

- Avaliar o fornecimento de energia elétrica da distribuidora em diversos aspectos de qualidade: indicadores de qualidade individuais, indicadores do produto entregue pela distribuidora, dentre outros.
- Medir os indicadores de Eficiência Energética das subestações;
- Elaborar a ferramenta de seleção e classificação das subestações de energia que tenham eficiência energética e inteligência embarcada, com suporte de método de apoio a decisão multicritério;
- Propor indicadores e respectivas métricas para avaliação e determinação do grau de inteligência das subestações, medindo também a eficiência energética.

1.3

Motivações para o trabalho

Em esfera institucional, na qual a pesquisa se insere, considera-se que esse trabalho proporcionará à área de Gestão de Energia da empresa analisada nessa pesquisa e aos diversos atores envolvidos a visão da qualidade da energia atualmente entregue, a eficiência energética e a inteligência do parque.

De modo geral, a principal motivação desta pesquisa refere-se ao ganho obtido no aumento do nível de gerenciamento da rede, na perspectiva da minimização da exposição aos riscos relacionados à falta de fornecimento de energia, aumentando assim o ganho na confiabilidade no fornecimento de energia.

De maneira específica, acredita-se que por meio da utilização dos indicadores propostos nessa pesquisa e a utilização da ferramenta de seleção e classificação de desempenho é possível avaliar as perdas dos sistemas (ineficiência) a fim de, futuramente, propor melhorias que propiciem um aumento de eficiência e reduza os riscos relacionados ao fornecimento de energia.

1.4

Metodologia

Com o objetivo de auxiliar o desdobramento dos assuntos a serem abordados neste estudo de caso, utilizou-se o método de mapa mental, criado por Tony Buzan. A metodologia é capaz de auxiliar na gestão do pensamento, organizando os conteúdos a serem discutidos e sua abrangência, ilustrados na figura 1 a seguir (BUZAN, 2009).

A figura 1 apresenta o mapa conceitual, cujo tema central é eficiência energética.

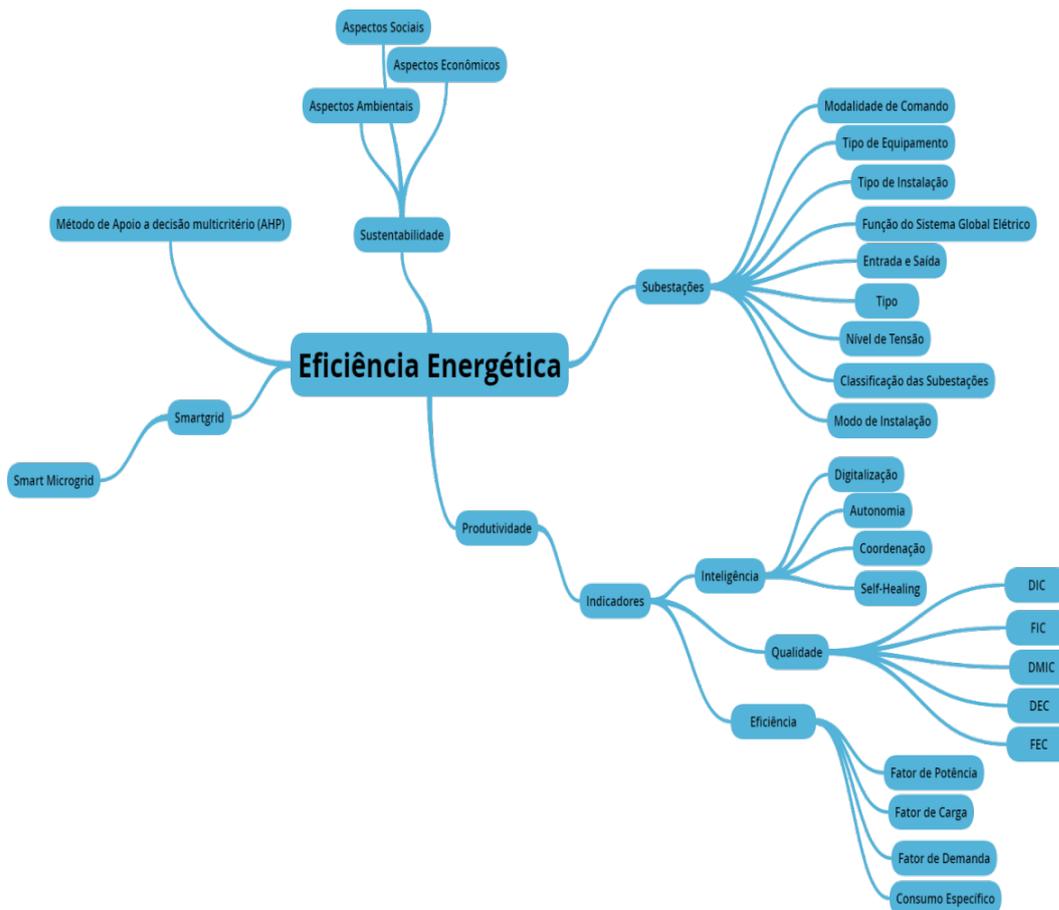


Figura 1: Mapa mental da pesquisa.

Quanto aos meios de investigação, a metodologia compreendeu pesquisa bibliográfica e documental sobre os temas centrais da pesquisa, como indicado na figura 1. Durante o estudo de caso, foram propostos indicadores de eficiência energética integrado a dois métodos de apoio a decisão: AHP para definição dos pesos dos critérios classificatórios e TOPSIS para classificação das subestações propostos por categoria de requisitos da regulamentação, a partir dos graus atribuídos pelos especialistas. Destacam-se como resultados a ferramenta de seleção e classificação de indicadores, visando a melhoria contínua.

1.5

Delimitação da pesquisa

A Pesquisa irá se restringir aos aspectos técnicos não entrando nos aspectos econômicos contratuais (Ambiente de Contratação Livre e Ambiente de Contratação Regulado). Para isso, serão relevantes nesta dissertação variáveis

como DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora), FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora), DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora), Fator de Potência, Fator de Carga, Fator de Demanda. Além disso, por meio de entrevistas com especialistas da empresa objeto de estudo foi feito um levantamento da classificação das subestações referente à Inteligência da Rede, sob aspectos tais como Supervisão e Controle, autonomia, coordenação e *selfhealing* (restabelecimento), que serão utilizados como dados para análise lógica. Com esses dados, pode-se ter uma visão clara do atual cenário energético que a empresa em questão se encontra, identificando seus principais ofensores.

O Microgrid em questão não pode sofrer nenhuma interrupção dado que o funcionamento da empresa em questão se dá 24 horas por dia. Sendo assim, para suprir uma possível falta, existem espalhados pelo parque geradores de energia, que só entram em funcionamento caso haja falha de energia, e uma cogeração que suporta a rede. No entanto, tais agentes não serão considerados na pesquisa.

As quatro subestações estudadas fazem parte de um conjunto de subestações de um parque industrial. Foi considerado um dia de medição de cada uma das subestações, não há qualquer influência quanto ao dias da semana, pois o parque funciona todos os dias de maneira ininterrupta, não há portanto uma sazonalidade. O estudo se limitou a apenas quatro estações, devido ao acesso as medições. Nem todas as subestações são inteligentes o suficiente para a coleta dos dados sem interrupção para conexão de equipamento apropriado para a medição. Em um estudo posterior, pretende-se apurar a medição das quinze subestações.

Além disso, por meio de entrevistas com especialistas da empresa objeto de estudo foi feito um levantamento da classificação das subestações referente à Inteligência da Rede, sob os seguintes aspectos como supervisão e controle, autonomia, coordenação e *selfhealing*, que serão utilizados como dados para análise lógica. Com esses dados, pode-se ter uma visão clara do atual cenário energético que a empresa em questão se encontra no momento, identificando seus principais ofensores.

1.6

Organização da dissertação

A fim de alcançar os objetivos deste estudo, a dissertação está estruturada em 5 capítulos, incluindo a introdução.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos de subestações, funções, classificações e modo de instalação dos equipamentos.

No Capítulo 3 apresenta-se os conceitos de eficiência energética, definição e as Políticas brasileiras de eficiência energética, além de apresentar a evolução dessas políticas no país. Mostra os aspectos econômicos, sociais e ambientais envolvidos na questão. Além de apresentar o sistema de tarifação existente e como esse reflete ou não a eficiência dos sistemas de energia elétrica. Apresenta os indicadores utilizados para medir a eficiência e inteligência de um sistema. Ainda nesse capítulo são apresentados os conceitos de *Smart Grid* (SG) e Microgrid e os indicadores utilizados para medir a inteligência da rede.

No capítulo 4 foi apresentada a metodologia e os métodos multicritério de apoio à decisão, utilizados nessa pesquisa: método analítico hierárquico (sigla em inglês, AHP), será aplicado para definir pesos dos critérios escolhidos e a técnica TOPSIS que classificará as subestações.

No capítulo 5, relata-se e discute-se os resultados dessa pesquisa aplicada. Primeiramente, com a apresentação dos critérios e os respectivos pesos e posteriormente com a classificação final das subestações.

O último capítulo apresenta a discussão dos resultados e as conclusões do trabalho, bem como propostas de pesquisas futuras.

2

Subestações

2.1

Conceitos gerais

Uma subestação (SE) é uma instalação elétrica de alta potência, podendo ser de alta tensão (AT) ou média tensão (MT), em que vários equipamentos estão ligados entre si de forma a ser possível atuar na rede, protegendo-a e controlando-a, principalmente transformando os níveis de tensões. O seu principal objetivo é transformar energia elétrica de alta tensão para média tensão e vice-versa (REIS, 2014).

Segundo Muzy (2012) a SE é um conjunto de equipamentos que tem o objetivo de monitorar o fluxo de potência, transformar as tensões e modificar a corrente elétrica, bem como garantir a proteção do sistema elétrico.

Para Duailibe (1999) o conceito de SE é mais amplo, tratando-se de um conjunto de equipamentos de manobra e/ou transformação e ainda eventualmente de compensação de reativos, usado para dirigir o fluxo de energia em sistema de potência e possibilitar a sua diversificação por meio de rotas alternativas, possuindo dispositivos de proteção capazes de detectar os diferentes tipos de faltas que ocorrem no sistema e de isolar os trechos onde tais falhas ocorrem.

Muzy (2012) explica o funcionamento da SE, como ponto de controle e transferência em um sistema de transmissão elétrica, direcionando e controlando o fluxo energético, transformando os níveis de tensão e funcionando como pontos de entrega para consumidores industriais.

Durante o percurso entre as usinas de energia e as cidades, a eletricidade passa por diversas SEs, onde os transformadores podem aumentar ou diminuir a sua tensão.

Ao elevar a tensão elétrica no início da transmissão, os transformadores evitam a perda excessiva de energia ao longo do caminho. Entretanto, ao rebaixarem a tensão elétrica perto dos centros urbanos, permitem a distribuição da energia por toda a cidade (MUZY, 2012).

2.2

Macroclassificações de subestações – SEs

A construção de novas subestações e ampliação das instalações existentes são projetos comuns em empresas de energia elétrica. Envolve um complexo processo e por isso é preciso um grande número de profissionais altamente habilitados e capacitados, para o êxito e a excelência dos serviços (MUZY, 2012).

Segundo McDonald (2007), existe quatro tipos principais de subestações elétricas, as quais são descritas abaixo.

- *Switchyard*: Tendem a ser grandes instalações e estão sujeitas ao planejamento, às finanças e aos esforços de construção diferentes dos projetos de subestações de rotina. São instalações que conectam os geradores à rede elétrica e também fornecem energia em *offsite* para a planta.
- Subestação do cliente: possui um cliente particular como a principal fonte de fornecimento de energia. Os requisitos técnicos dessa subestação variam de acordo com as necessidades de cada cliente, tendo pouca influência os Serviços Públicos.
- Estação de comutação: em geral são subestações maiores e localizadas como ponto final de linhas de transmissão, são instalações estratégicas e com elevado custo de construção e manutenção. Fornecem a energia elétrica para os circuitos que alimentam as estações de distribuição e são essenciais para a confiabilidade a longo prazo e para integridade do sistema elétrico
- Distribuição: geralmente alocadas próximas aos centros de carga, são mais comuns em sistemas de energia elétrica e fornecem aos circuitos de distribuição que abastecem diretamente a clientes diversos.

2.3

Classificação das subestações

Classificou-se as subestações com base em dois autores: Duailibe (1999) e Muzy (2012). As classificações de subestações podem ser quanto à função do sistema elétrico, à instalação, ao nível de tensão, à exposição ao ambiente, ao tipo de instalação, ao equipamento e à modalidade de comando. Serão descritos nos subtópicos a seguir estas classificações.

2.3.1

Em função do sistema elétrico

- **Subestação transformadora:** é aquela que converte a tensão de suprimento para um nível diferente, maior ou menor, sendo designada, respectivamente, SE Transformadora Elevadora ou SE Transformadora Abaixadora. Geralmente, uma subestação transformadora próxima aos centros de geração é uma SE elevadora. Subestações no final de um sistema de transmissão, próximas aos centros de carga, ou de suprimento a uma indústria são SE transformadora abaixadora.
- **Subestação seccionadora, de manobra ou de chaveamento:** é aquela que interliga circuitos de suprimento sob o mesmo nível de tensão, possibilitando a sua multiplicação. É também adotada para possibilitar o seccionamento de circuito, permitindo sua energização em trechos sucessivos de menor comprimento.

2.3.2

Modo de instalação dos equipamentos em relação ao meio ambiente

- **Subestação externa ou ao tempo:** é aquela em que os equipamentos são instalados ao tempo e sujeitos, portanto, às condições atmosféricas desfavoráveis de temperatura, chuva, poluição, vento etc., as quais

desgastam os materiais componentes exigindo, portanto, manutenção mais frequente e reduzem a eficácia do isolamento.

- **Subestação interna ou abrigada:** é aquela em que os equipamentos são instalados ao abrigo do tempo, podendo tal abrigo consistir de edificação e de uma câmara subterrânea. Subestações abrigadas podem consistir de cubículos metálicos, além de subestações isoladas a gás, tal como o hexafluoreto de enxofre (SF₆).

Muzy (2012) apresenta outros tipos de classificação, como descritos a seguir:

2.3.3

Quanto ao nível de tensão

Podem ser divididas em: Baixa Tensão, Média Tensão, Alta Tensão ou Extra-alta Tensão.

- **Baixa Tensão:** de níveis de tensão de até 1 kV;
- **Média Tensão:** níveis de tensão entre 1 kV e 34,5 kV (tensões típicas: 6,6 kV; 13,8 kV; 23 kV e 34,5 kV).
- **Alta Tensão:** níveis entre 34,5 kV e 230 kV (tensões típicas: 69 kV; 138 kV; 230 kV).
- **Extra-Alta Tensão:** níveis maiores que 230 kV (tensões típicas: 345 kV; 440 kV; 500 kV; 750 kV).

2.3.4

Quanto à função ao sistema elétrico global

O importante ao classificar é a potência que passa por ela, não sendo associada à tensão. Classificam-se em: transmissão, subtransmissão e distribuição.

- **Transmissão:** é a base (tronco), a energia sai do gerador e segue para a subestação de transmissão ou usina elétrica. Usa grandes

transformadores para aumentar a tensão do gerador, para transmissão de longas distâncias.

- **Subtransmissão:** sua finalidade é o transporte de energia elétrica das subestações de transmissão para as subestações de ramificações.
- **Distribuição:** a potência é levada diretamente ao consumidor (cargas). Recebe energia das linhas de subtransmissão e as conduz para a rede de distribuição, em geral com abaixamento de tensão.

2.3.5

Quanto ao tipo de instalação

Classificam-se em: externas ou internas. A seguir estas duas classificações são descritas.

- **Externas:** são construídas em lugares ao ar livre. Necessidade de equipamentos específicos para funcionamento em condições atmosféricas adversas (chuva, vento, poluição etc.), que desgastam os aparelhos, o que exige manutenção frequente.
- **Internas:** são erguidas em lugar fechado, o que protege os aparelhos de intempéries. Subestações abrigadas podem ser cabines metálicas, além de isoladas a gás, tal como o hexafluoreto de enxofre (SF_6).

2.3.6

Quanto ao tipo construtivo de equipamentos

Podem ser classificadas em convencionais, em cabine metálica ou blindadas. A diferença baseia-se na potência instalada, configuração construtiva e função no sistema.

- **Convencionais:** são frequentemente utilizadas e foram as primeiras a serem instaladas. Ocupam grande espaço físico devido a instalação ser feita a céu aberto e ter o ar como isolante entre os aparelhos. Devido

ao crescimento urbano, percebeu-se a necessidade de criar subestações menores e mais compactas.

- **Cabine metálica ou blindada:** em geral utiliza-se o gás hexafluoreto de enxofre (SF_6) como isolante em ambiente fechado e blindado, o que permite diminuir a instalação. O espaço utilizado chega até 10% de uma SE convencional. Além disso, há baixa manutenção e a operação é segura (inteiramente contidas em invólucros metálicos). Também está disponível em níveis de tensão de até 500 kV. A principal desvantagem é a necessidade de instrumentos e equipamentos especiais para manusear o SF_6 ,

2.3.7

Quanto à modalidade de comando

Classificam-se em: com operador, semiautomatizadas e automatizadas. Cada um destes tipos de subestação são descritos a seguir:

- **Subestações com operador:** alto nível de treinamento de equipe e uso de computadores na supervisão e operação. Relevante para instalações de maior porte.
- **Semiautomatizadas:** possuem computadores ou intertravamentos eletromecânicos que evitam intervenções impróprias por parte do operador local.
- **Automatizadas:** são supervisionadas à distância por intermédio de computadores (telecomandadas).

2.4

Principais equipamentos das subestações

Segundo Reis (2014) as subestações apresentam os seguintes equipamentos e que são sumarizados na figura 2.

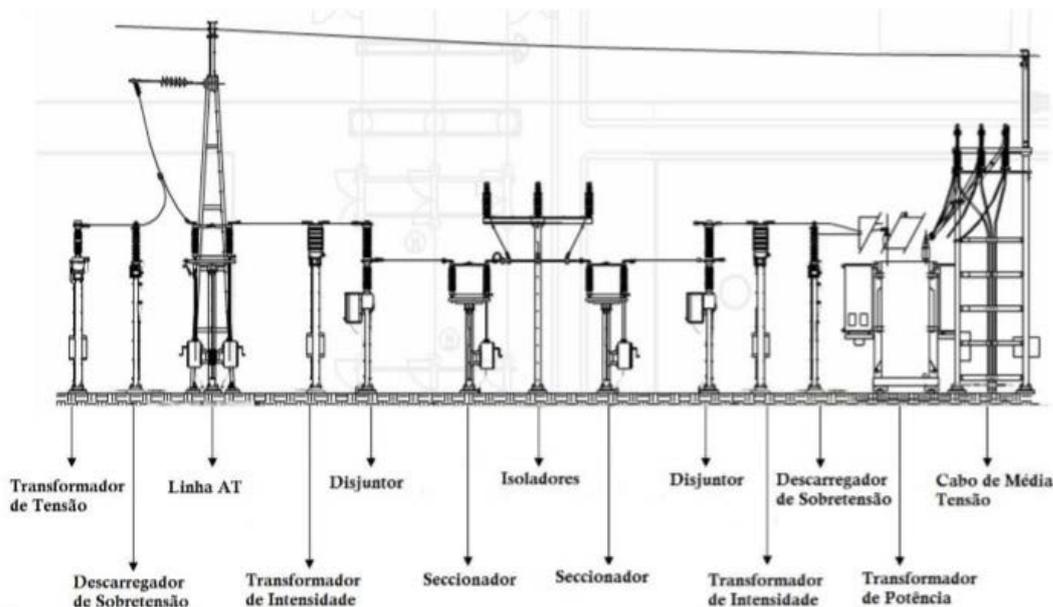


Figura 2: Esquema de uma subestação.
Fonte: REIS (2014).

- **Transformador de Potencial (TP):** um transformador de potencial tem como funcionalidade transformar tensões reais em tensões mais reduzidas, de modo a serem medidas pelos equipamentos de proteção, comando e controle. Por exemplo, se o transformador tiver uma relação de transformação 60000/100 volts e se estiverem 60000 volts no primário, no secundário do transformador surgem 100 volts;
- **Descarregador de Sobretensão:** um descarregador de sobretensão serve de protetor relativamente ao excesso de tensão. Caso a tensão seja superior à tensão esperada (essa alteração pode dever-se, por exemplo, às descargas atmosféricas diretas nas linhas de alta tensão), o equipamento descarrega a tensão para o circuito terra;
- **Transformador de Corrente (TC):** os transformadores de Corrente têm como funcionalidade transformar correntes reais em correntes bastante mais reduzidas, de forma a ser possível a medição por parte dos contadores e das unidades de proteção. Por exemplo, nos transformadores de intensidade que tenham uma relação de transformação 800/1 Ampère, quando no primário circulam 800 ampere, no secundário do transformador circula 1 ampère;

- **Linhas AT:** as linhas AT estabelecem a ligação elétrica entre as saídas de Subestações Média-Alta-Tensão/Alta Tensão e algumas centrais de produção até as subestações AT/MT;
- **Disjuntores:** os disjuntores servem de proteção a acontecimentos não desejados, como, por exemplo, as sobrecargas ou os curto-circuitos, de maneira a evitar que a ocorrência destes defeitos se torne perigosa. Permitem também a manobra da rede (alteração da topologia de rede, por exemplo);
- **Seccionador:** um seccionador é um dispositivo de corte sem poder de corte em carga. Permitem o corte visível. Destina-se à abertura física de um circuito para ações de manutenção. Os seccionadores só devem abrir em vazio;
- **Isoladores:** os isoladores servem, tal como o nome indica, para isolar um ou vários componentes da rede, de forma a proteger as linhas do calor, da água, de forças mecânicas, como também evitar perdas;
- **Transformador de Potência:** o transformador de potência é o equipamento mais caro de uma subestação. É através dele que é possível transformar bidirecionalmente entre AT e MT. Em certos casos, estes estão instalados no interior de um edifício, uma vez que também são aparelhos ruidosos que podem incomodar a população vizinha.

3

Eficiência Energética e *Smart Grid*

3.1

O conceito de eficiência energética

Com intuito de suprir as adversidades para redução de custos e desperdícios de energia elétrica torna-se crescente a demanda dos diversos setores da economia em busca de uma maior eficiência energética. Além de economizar com os gastos da produção, minimizam as emissões dos gases do efeito estufa, gerando benefícios ambientais e econômicos (GAMA NETO *et al.*, 2011; NOGUEIRA, 2007; PATTERSON, 1996).

O uso eficiente e racional da energia em processos produtivos, segundo Sup (2012), objetiva elevar o grau de competitividade e atender às normas de proteção ambiental. As empresas, de forma geral, precisam de um programa de eficiência energética, sobretudo no âmbito organizacional, independente do seu nível empresarial e de desenvolvimento, que gerem resultados positivos no que tange a economia de energia e, principalmente, duráveis.

O consumo de energia no setor industrial é determinado pelo grau da atividade, a estrutura do setor e da eficiência energética. As mudanças decorrentes no consumo de energia na indústria não são exclusivamente relacionadas a melhoramentos em eficiência energética nos processos deste setor, mas também a diversos outros fatores, tais como: políticos, econômicos e ambientais.

3.2

Causas da Ineficiência Energética

Nogueira (2007) e Caneppele (2011) destacaram que as causas de ineficiência energética são em função de:

- **Projeto deficiente:** em função da compreensão errada do ponto de vista do desenho, dos materiais, do processo de fabricação, os equipamentos

e/ou os sistemas, que levam a desperdícios de energia (e. g., por utilizar equipamentos ineficientes);

- **Operação ineficiente:** quando os sistemas de energia são bem projetados, mas utilizado irresponsavelmente, por exemplo, ocasionando o desperdício;
- **Manutenção inadequada:** parte das perdas e dos desperdícios de energia poderia ser minimizada realizando as devidas manutenções corretiva e preventiva, que inclui a correta regulagem e controle dos sistemas.

3.3

Definição de Eficiência Energética ao longo dos anos

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2010) trabalhou na conceituação de eficiência energética, como sendo “a relação entre a quantidade final utilizada e de bem produzido ou serviço realizado”.

No mesmo sentido, o quadro 1 apresenta algumas definições quanto a eficiência energética, assim como realizado por Silva *et al.* (2012) e Silva (2013b).

Quadro 1: Definições de Eficiência Energética.

AUTOR	CONCEITO	ENTENDIMENTO
Patterson (1996)	É a razão simples entre a potência útil de um processo e a entrada de energia de um processo.	Utilização de menos energia para produzir a mesma quantidade de serviço ou saída útil.
ABESCO (2001)	Atividade técnico-econômica que objetiva proporcionar o melhor consumo de energia e água com redução de custos operacionais correlatos; minimizar contingenciamentos no suprimento desses insumos, introduzir elementos e instrumentos necessários para o gerenciamento energético e hídrico da empresa.	Melhoria do consumo de energia com redução de custos.
NEPDG (2001)	Refere-se à relação entre entrada de energia consumida e a saída de um serviço energético.	Relação entre entrada e saída de energia.
Gardner e Stern (2002)	Refere-se a adoção de uma tecnologia específica que reduz mais de toda a energia de consumo sem alterar o comportamento em causa.	Adoção de tecnologias para redução do consumo.
Geller e Garcia (2003)	Consiste em reduzir perdas e eliminar desperdícios.	Redução de desperdícios.
Menkes (2004)	Capacidade de utilizar menos energia para produzir a mesma quantidade de iluminação, aquecimento, transporte e outros serviços baseados na energia.	Utilizar menos recurso para produzir mais.
Sola (2006)	Está ligado a minimização de perdas na conversão de energia primária em energia útil que realiza trabalho.	Minimização de perdas de energia.
MME (2007)	É a aplicação de serviços de energia proporcionadas com menor gasto de energia com repercussões econômicas, ambientais e culturais	Aplicação de serviços com menor gato de energia.
Irrek e Thomas (2008)	É descrição da relação entre o benefício ganho e a energia utilizada.	Relação entre benefício e energia utilizada.
Oikonomou <i>et al.</i> (2009)	Relação técnica entre a quantidade de energia primária ou energia final consumida e a quantidade máxima de energia e serviços suscetíveis de aquisição iluminação, aquecimento, refrigeração, mobilidade e outros.	Relação entre energia de entrada e energia final.
EPE (2010)	É a relação entre a quantidade final utilizada e de bem produzido ou serviço realizado.	Relação entre quantidade final e produto realizado.
ISO 50001 (2011)	É a razão entre ou outra relação quantitativa entre uma saída de desempenho, serviços, mercadorias ou energia e uma entrada de energia.	Razão entre uma saída de desempenho e uma entrada de energia.
ANEEL (2012)	É o consumo de energia elétrica necessário à realização de um determinado trabalho, excetuado o uso de energia proveniente de matéria-prima não utilizada, em escala industrial, na matriz energética.	Redução do consumo de energia para a realização de um certo trabalho.
CEPEL (2016)	Consiste em obter o melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto de energia.	Maior desempenho com menor gastos de energia.

Fonte: Elaboração própria.

Com base neste quadro, pode-se verificar que a eficiência energética está relacionada com a redução de custos, desperdícios de energia e sustentabilidade ambiental (SILVA, 2013b).

A eficiência energética é tida como uma das melhores políticas que podem ser adotadas por países para a redução da emissão de gases de efeito estufa e para a contribuição da economia e de ordem ambiental (CALILI, 2013; MENKES, 2004; PATTERSON, 1996).

Políticas de eficiência energética, constituem portanto, um importante instrumento de incentivo, implementação e articulação para a efficientização energética. O Brasil tem apresentado iniciativas políticas deste a década de 1970 e algumas dessas políticas serão apresentadas no capítulo 3.2.

3.4

Políticas brasileiras de eficiência energética

Há mais de trinta anos que o Brasil possui programas de Eficiência Energética reconhecidos internacionalmente. Os principais programas estão descritos a seguir (CEPEL, 2014):

- **Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE:** Em 1984, o INMETRO iniciou, com o Ministério de Minas e Energia, uma discussão sobre a conservação de energia, com a finalidade de contribuir para a racionalização no seu uso no país, informando os consumidores sobre a eficiência energética de cada produto, estimulando-os a fazer uma compra mais consciente. Esse esforço deu início ao Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). O PBE promove a eficiência energética por meio de etiquetas informativas a respeito do desempenho de máquinas e equipamentos energéticos, sendo de adesão compulsória para alguns equipamentos a partir da Lei 10.295, publicada em outubro de 2001 (conhecida por “Lei de Eficiência Energética”).
- **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Procel:** Criado em 1985, coordenado pelo MME e operacionalizado pela Eletrobrás, o Procel é constituído por diversos subprogramas, dentre os

quais se destacam ações nas áreas de iluminação pública, industrial, saneamento, prédios públicos, gestão energética municipal.

- **Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural – Conpet:** Criado em 1991, coordenado pelo MME e operacionalizado pela Petrobras, o Conpet é constituído por vários subprogramas, possui maior destaque nas áreas de educação, marketing e transporte (de carga ou de passageiro).
- **Os Programas de Eficiência Energética das Concessionárias:** No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel estabelece obrigações e encargos das Concessionárias de Energia Elétrica perante o poder concedente. Uma dessas obrigações consiste em aplicar anualmente o montante de no mínimo 0,5 % de sua receita operacional líquida, em ações que tenham por objetivo o combate ao desperdício de energia elétrica.
- **A Lei de Eficiência Energética:** A Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, sistematiza a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, estabelecendo “níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos fabricados ou comercializados no País”. Este é o marco regulatório da eficiência energética no país e a principal política governamental existente.
- **O Plano Nacional de Eficiência Energética – PNEf:** Para fazer frente ao desafio de economizar 10% de energia no horizonte de 2030, o Plano Nacional Eficiência Energética (PNEf) objetiva alinhar os instrumentos de ação governamental, orientar a captação dos recursos, promover o aperfeiçoamento do marco legal e regulatório afeto ao assunto, constituir um mercado sustentável de Eficiência Energética e mobilizar a Sociedade brasileira no combate ao desperdício de energia, preservando recursos naturais. O MME tem a responsabilidade de coordenar as atividades de implantação do Plano, acionando ou promovendo negociação com outros órgãos do Governo Federal, Congresso Nacional, Estados, Municípios, Associações, Confederações, Universidades e instituições representativas.

Calili (2013) explica que o PNEf exige a análise de alternativas de novas formas de investimento em eficiência energética através de estudos de aperfeiçoamento da regulação, inserindo instrumentos, tais como: o gerenciamento pelo lado da demanda (GLD), tarifa branca (tarifas diferenciadas para consumidores de baixa tensão – residenciais e comerciais – no horário de ponta do sistema, entre as 17 às 21 horas) e projetos pelo lado da oferta no programa da ANEEL. É importante destacar que alguns destes mecanismos são passíveis de implementação de medição inteligente (*smart metering*).

3.5

A eficiência energética no âmbito do planejamento energético

A energia é insumo básico para as atividades produtivas, um fator que está presente em todos os aspectos da vida humana. Em qualquer atividade, o homem consome direta e/ou indiretamente energia, gerando um fluxo energético que perpassa o sistema econômico. Desta forma, deve ser entendida como um elemento fundamental ao desenvolvimento econômico e social (FURTADO, 2015).

Para o planejamento energético clássico, a energia sempre foi vista como um setor produtivo da economia onde a controle era feito apenas pelo lado da oferta (AGUIAR, 2004; CANEPPELE, 2011). Entretanto, a demanda compõe,- ao lado da oferta considerado, a base para um planejamento energético mais coeso (AGUIAR, 2004).

Caneppele (2011) discorre sobre os motivos para que a utilização de energia elétrica seja reduzida, sem a perda do bem-estar ou o nível de produção. Essas medidas formam o cerne para que as ações proporcionem o aumento da eficiência energética e a redução do desperdício sejam praticadas pelos agentes do lado da demanda. Dessa forma, a eficiência energética pode ser vista como uma mudança dos paradigmas de planejamento energético.

Poole (1994) *apud* Caneppele (2011) indicam as motivações para o menor consumo de energia elétrica, são de ordem econômica, ecológica, social e de segurança estratégica, como se segue:

3.5.1

Aspectos Econômicos

No âmbito do objetivo econômico, a eficiência energética forma novas áreas ou expande áreas já criadas em que os investimentos feitos produzem um retorno do investimento. Além disso, a eficiência energética provoca “a diminuição das pressões financeiras sobre o setor energético, a modernização dos produtos e processos, aumento da produtividade e qualidade da indústria como um todo” (MENKES, 2004).

Acredita-se que a sinalização das tarifas energéticas seria a necessária para que naturalmente surja de maneira mais intensa o uso eficiente da energia. É importante considerar que essa sinalização produz uma motivação econômica, o que torna o setor capitalizado e pronto para se lançar em novos empreendimentos, como por exemplo, geração e transmissão de energia. Para que a eficiência energética seja atendida na sua totalidade é necessário não somente a aplicação de tarifas realistas e de tecnologias avançadas para conter o desperdício, mas também é necessário:

- Padronização de equipamentos para normatizar e organizar os processos com a finalidade de aumentar a produtividade e reduzir custos. Dessa forma, o produto atende às necessidades de mercado com menor custo e variação possível.
- Acesso facilitado a financiamento para a substituição de equipamentos não eficientes correndo em paralelo com o programa de reciclagem, o que traria múltiplos benefícios, como por exemplo, estímulo a eficiência e, favorecimento de uma estrutura de reciclagem que precisa ser expandida para solucionar o problema ambiental do lixo e dos rejeitos em geral.

3.5.2

Aspectos Ambientais

É notório o crescimento da preocupação ambiental no Brasil e no mundo, que vai desde a verificação da poluição aérea dos centros urbanos, da poluição dos rios que recebem efluentes sem tratamento, da poluição dos solos degradado pelo desmatamento, do processo de mineração, e da maior emissão de gases do efeito estufa na atmosfera.

Através da aplicação de uma maior eficiência energética, qualquer redução no consumo energético, colaborará para não construção imediata de empreendimentos de geração, além dos empreendimentos em grandes sistemas de transmissão e distribuição. Isto não só diminuiria os impactos diretos sobre o meio ambiente, mas também as emissões de CO₂, favorecendo o país em negociações internacionais (MENKES, 2004).

3.5.3

Aspectos Sociais

No Brasil pode-se falar de ineficiência energética, considerando-se os desperdícios e o mau uso da e a existência de uma ineficiência social, como demonstram os índices de desenvolvimento humano.

Segundo Menkes (2004) seriam indicadores de dimensão social: Cobertura elétrica: percentual de municípios eletrificados e Cobertura das necessidades energéticas básicas; consumo de energia útil residencial.

A OCDE também emprega indicadores socioambientais que interatuam com o setor energético. São eles: exposição a emissões, acidentes/segurança do trabalho, emprego no setor energético, condições de trabalho, sindicatos, qualidade de trabalho, demanda energética, justiça ambiental, proporção de pobres morando perto de instalações energéticas, acesso à informação ambiental, participação pública no processo de tomada de decisão do setor energético, educação ambiental e treinamento, uso de produtos energeticamente eficientes.

Os indicadores usados comprovaram ser eficazes para a monitoração do setor energético à luz do enfoque do meio ambiente e a integração da economia

com as decisões ambientais, de acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômicos, OCDE (2000).

3.5.4

Segurança Estratégica

O mundo contemporâneo conheceu após o choque do petróleo os aspectos estratégicos da dependência de uma única fonte de energia. Apesar do Brasil não ser tão dependente do petróleo para a geração de eletricidade, hoje já se consome gás natural importado, especialmente na geração descentralizada.

O que motiva o investimento privado na autoprodução é uma possível crise no abastecimento de energia, o que também traz oportunidade do investidor vender os seus excedentes de energia produzida, aumentando a oferta deste insumo.

3.6

Sistema de tarifação

O entendimento de como é cobrada a energia elétrica e a forma como são calculados os valores apresentados nas contas de luz é de extrema importância para tomada de decisão quando se fala em projetos e programas de eficiência energética (CANEPPELE, 2011).

A conta de energia é a representação de como a energia elétrica é utilizada e, analisando-a por um período de tempo adequado, se pode determinar importantes relações entre hábitos e consumo. Tendo-se as alternativas de enquadramento tarifários disponíveis para alguns consumidores, o conhecimento da formação da conta e dos hábitos de consumo permite escolher a forma de tarifação mais adequada e que acarrete em menor gasto com a energia elétrica (PROCEL, 2001).

3.6.1

Classificação dos consumidores

No Brasil, o sistema tarifário de energia elétrica é determinado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que estabelece também os critérios de classificação dos consumidores e as formas de cobrança de energia elétrica (SOLER *et al.*, 2016).

As unidades consumidoras são classificadas em dois grupos tarifários grupos A e B. O Grupo A (alta tensão) tem tarifa binômica, ou seja, são cobrados tanto pela demanda quanto pelo que consomem de energia. Já o Grupo B (baixa tensão) tem tarifa monômica, ou seja, é cobrado somente pela energia que consomem (CANEPPELE, 2011; CARÇÃO, 2011; SOLER *et al.*, 2016).

Os grupos são definidos, basicamente, em função do nível de tensão em que são atendidos e também, como consequência, em função da demanda (kW) (PROCEL, 2001).

O Ministério de Minas e Energia (2011) aponta que as unidades consumidoras atendidas em tensão abaixo de 2.300 volts são classificadas no Grupo B (baixa tensão). Em geral, estão nesta classe as residências, lojas, agências bancárias, pequenas oficinas, edifícios residenciais, grande parte dos edifícios comerciais e a maioria dos prédios públicos federais, uma vez que, na sua maioria são atendidos nas tensões de 127 ou 220 volts. O Grupo B é dividido em subgrupos, de acordo com a atividade do consumidor, conforme apresentados a seguir:

- Subgrupo B1 – residencial e residencial baixa renda;
- Subgrupo B2 – rural e cooperativa de eletrificação rural;
- Subgrupo B3 – demais classes;
- Subgrupo B4 – iluminação pública.

São classificados como grupo A os consumidores atendidos em alta tensão, acima de 2.300 volts, como indústrias, *shopping centers* e alguns edifícios comerciais. Esse grupo é subdividido de acordo com a tensão de atendimento, como mostrado a abaixo (MME, 2011):

- Subgrupo A1 – para o nível de tensão de 230 kV ou mais;
- Subgrupo A2 – para o nível de tensão de 88 a 138 kV;

- Subgrupo A3 – para o nível de tensão de 69 kV;
- Subgrupo A3a – para o nível de tensão de 30 a 44 kV;
- Subgrupo A4 – para o nível de tensão de 2,3 a 25 kV;
- Subgrupo AS – para sistema subterrâneo.

3.6.2

Composição tarifária

Silva (2013a) discutiu amplamente sobre a composição tarifária brasileira, fazendo uma análise e levantamento em nível nacional, com base na Lei federal nº 12.783 de 11 de janeiro de 2013. Este subtópico está baseado neste autor.

O sistema elétrico brasileiro tem como características um mercado com pouca competição no setor, em função dos elevados os investimentos que são necessários para o ingresso no mercado de geração, transmissão e distribuição de energia. Por este e outros motivos que foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pela Lei nº 9.427/96, que tem com funções regular e fiscalizar a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no país.

Antes da existência dessa Lei, as tarifas homologadas eram iguais para todas as concessões. Dessa forma, não havia incentivo financeiro para busca de eficiência no serviço de entrega de eletricidade. Após a promulgação desta Lei, as tarifas passaram a ser individuais para cada concessão, levando em conta a estrutura de cada uma das concessionárias, levando em consideração os custos e o equilíbrio financeiro para manutenção das mesmas. O quadro 2 a seguir apresenta a estrutura de custos de uma concessionária do setor elétrico.

Em 2013, o governo federal aprovou a Lei 12.783/2013 com a finalidade de reduzir a tarifa de energia elétrica no país. Essa mudança trouxe a extinção de dois encargos: Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) e a Reserva Global de Reversão (RGR), além de determinar a redução de 75% da Conta de Desenvolvimento Energético (CDE). Dessa forma, as tarifas de energia elétrica dos consumidores do subgrupo B1 e B3 tiveram uma redução da ordem de 18% e 23% em média, respectivamente, a partir de 14 de janeiro de 2013.

Quadro 2: Receita de uma distribuidora de energia elétrica.

Composição da Receita Requerida	
Parcela A (custos não gerenciáveis)	Parcela B (custos gerenciáveis)
<p align="center">Encargos Setoriais</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cotas da Reserva Global de Reversão (RGR) extinta pela lei 12.783/2013) - Conta de Consumo de Combustíveis Fosséis (CCC) (extinta pela lei 12.783/2013) - Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) - Compensação Financeira pelo Uso de Recursos Hídricos (CFURH) - Taxa de Fiscalização de Energia Elétrica (TFSEE) - Contribuição ao ONS - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) - Encargos de Serviços do Sistema (ESS) - Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) - Eficiência Energética <p>Encargos de Transmissão</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uso de instalações da rede básica de transmissão de energia elétrica - Uso de Instalações de Conexão - Uso de Instalações de Distribuição <p>Compra de Energia Elétrica para Revenda</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mercado Cativo - Suprimentos - Perdas Técnicas - Perdas Não Técnicas - Contratos Bilaterais - Contrato Itaipu - Contrato Leilões - Contrato comercialização de energia no ambiente regulado 	<p align="center">Despesas de Operação e Manutenção</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pessoal - Material - Serviços de Terceiros - Despesas Gerais <p align="center">Despesas de Capital</p> <ul style="list-style-type: none"> - Depreciação - Remuneração do Capital

Fonte: Adaptado de Silva (2013a)

Conforme apresentado no quadro 2, a receita de uma distribuidora de energia elétrica no Brasil é composta por 2 (duas) parcelas, A e B. A Parcela A refere-se aos custos não gerenciáveis da concessão, que são os encargos setoriais, de transmissão e custos com a compra de energia elétrica. A Parcela B, refere-se aos custos gerenciáveis da concessão, ou seja, nas despesas operacionais de capital e manutenção da concessionária.

A seguir, discorre-se o que compõe cada uma das parcelas.

Parcela A – Custos não gerenciáveis

A Parcela A refere-se aos custos não gerenciáveis, ou seja, os custos que independem das decisões das concessionárias. A composição dessa parcela é composta basicamente de encargos setoriais, encargos de transmissão e custos com aquisição de energia elétrica, conforme descrito abaixo:

Encargos Setoriais

Os encargos setoriais são legalmente fixados pelo governo federal e, de maneira geral, se propõem a subsidiar as iniciativas do Estado no setor elétrico.

A Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE) foi instituída por meio da Lei nº 9.427/96, com o objetivo de financiar os custos operacionais das atividades da ANEEL. A alíquota desse encargo é definida anualmente pela própria agência reguladora.

Os encargos referentes à Pesquisa e Desenvolvimento Energético (P&D) foram instituídos por meio da Lei nº 9.991/00, a qual estabelece que as concessionárias do setor elétrico devem aplicar anualmente 0,50% e 0,50%, respectivamente, de sua receita operacional líquida em projetos de pesquisa e desenvolvimento e programas de eficiência energética.

Para cobrir os gastos operacionais do Operador Nacional do Sistema (ONS) foi instituída uma contribuição obrigatória para as concessionárias, através do Decreto nº 5.081/04.

A Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) foi criada por meio da Lei nº 10.438/02 com a finalidade de promover a diversificação da matriz energética brasileira, principalmente a partir de fontes renováveis. Outra finalidade do referido encargo é expandir a rede de atendimento em todo o território nacional.

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) foi instituído por meio do Decreto nº 5.025/04 para aumentar a participação da energia produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólicas, biomassa e PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas) integrados ao Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN).

Finalmente, os Encargos de Serviço do Sistema (ESS), criados pelo Decreto nº 5.163/04, tem o objetivo de manter a segurança, a confiabilidade e a estabilidade no atendimento do consumo de energia elétrica no Brasil.

Encargos de Transmissão

Para transportar a energia das usinas elétricas até o consumidor, as distribuidoras pagam uma tarifa às Transmissoras referente ao uso da Rede Básica de transmissão (Sistema Interligado Nacional de linhas de transmissão de energia elétrica com tensão igual ou superior a 230kV). A cobrança também é feita para empresas de geração e clientes de alta tensão.

Os encargos com uso de sistema de conexão referem-se aos valores pagos pelas distribuidoras que não integram a Rede Básica, enquanto que os encargos com uso de distribuição referem-se aos valores devido ao uso da rede de distribuição de outra concessionária. Compra de Energia Elétrica Referem-se ao custo da distribuidora com a aquisição da energia elétrica necessária para atender a área de concessão. Esse item engloba gastos com Suprimento, Perdas Técnicas e Perdas Não-Técnicas (furto de energia e inadimplência).

A compra de energia elétrica para revenda por parte das concessionárias pode ser realizada através de diversos meios, como contratos bilaterais entre distribuidoras, contrato de leilões, contratos de ITAIPU e Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CARÇÃO, 2011).

Parcela B – Custos gerenciáveis

A Parcela B, refere-se aos custos gerenciáveis, ou seja, custos diretamente gerenciados pelas concessionárias. Entre eles estão o custo operacional, a remuneração de ativos e a remuneração dos investimentos realizados.

A taxa de remuneração dos ativos no setor elétrico brasileiro é regulada pela ANEEL, a partir da adoção de metodologia própria para o estabelecimento de uma taxa de remuneração adequada do capital investido pelas concessionárias. Essa taxa de retorno é definida pela ANEEL periodicamente, através do ciclo de revisão tarifária.

Outro componente da Parcela B são as Quotas de Reintegração, compostas por valores referentes à amortização e depreciação dos investimentos realizados pela concessionária. O principal componente dos custos gerenciáveis são justamente operacionais, pois estão ligados a atividade-fim da concessionária.

Uma vez apresentados os componentes da receita de uma concessionária de energia, levado em consideração pela ANEEL para a homologação de uma

tarifa que assegure o equilíbrio econômico-financeiro, convém analisar a composição da tarifa homologada pela agência reguladora. De maneira geral, a tarifa aplicada aos consumidores de energia elétrica pode ser dividida em dois grandes componentes: a Tarifa de Energia (TE) e a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD). Cabe destacar que a TE e a TUSD, evidenciadas no quadro 3 a seguir, são aquelas referentes aos consumidores cativos, sendo que os referidos componentes apresentam diferenças para livres.

A TUSD é a tarifa rateada e paga pelos usuários atendidos pelas distribuidoras de energia, como por exemplo, clientes residenciais, comerciais e rurais. Cada componente da TUSD destina-se a cobrir componentes específicos da receita requerida da concessionária.

A Tarifa de Energia se aplica a energia adquirida pelas distribuidoras para atender os consumidores cativos de alta e baixa tensão. Seus principais componentes são o custo de aquisição da energia e as perdas na Rede Básica. Cabe ainda salientar que os valores referentes à P&D, Eficiência Energética e TFSSE (Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica), por estarem vinculados a receita da concessionária, estão alocados na TUSD e TE (CARÇÃO, 2011).

Quadro 3: Composição tarifária de energia elétrica.

TUSD	Parcela A	TUSD – FIO A	TUST – Rede básica TUST – Rede fronteira TUST – Custo uso de sistema de transmissão TUST – Uso da rede de distribuição de outras concessionárias
		TUSD Perdas Técnicas TUSD Perdas Não Técnicas	Perdas Elétricas – Perdas técnicas Perdas Elétricas – Perdas não técnicas
		TUSD – Encargos	Cotas de reserva globais de reversão (RGR) Pesquisa e desenvolvimento (P&D) Taxa de fiscalização de energia elétrica (TFSEE) Contribuição ao ONS
		TUSD – CCC	Conta de Consumo de Combustíveis Fósseis (CCC)
		TUSD – CDE	Conta de Desenvolvimento Energético (CDE)
		TUSD - PROINFRA	Programa de Incentivo às fontes alternativas de energia elétrica (Proinfra)
	Parcela B	TUSD – FIO - B	Remuneração dos ativos Quotas de reintegração Custos operacionais e de manutenção
TE	Custo de aquisição da energia elétrica Perdas elétricas na rede básica Custo ITAIPU Encargos de serviço do sistema (ESS) P&D, Eficiência energética e TFSSE		

Fonte: Adaptado de Silva (2013a).

A partir destas considerações, torna-se necessário que as organizações tenham um sistema de gestão de energia, que leve em consideração o custo da energia elétrica entre outras particularidades, as quais podem elevar a eficiência energética quanto aos custos econômicos com o insumo energia elétrica e ainda a redução de impactos ambientais provenientes deste consumo.

3.7

Sistema de gestão de energia

Sobre esta temática, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, através da norma internacional ISO 50001:2011, dispõe sobre o Sistema de Gestão de Energia – requisitos com orientação para uso, com o propósito de habilitar organizações a implantarem sistemas e processos úteis para melhorar o desempenho energético, englobando eficiência energética, uso e consumo de energia (ABNT, 2011).

A ISO 50001:2011 é utilizada como referência e foi projetado como forma de gerenciar a eficiência energética dentro de organizações, sendo tratada como uma ferramenta muito útil para qualquer empreendimento que decide melhorar a própria forma de consumo de energia (SOTO *et al.*, 2014).

O Sistema de Gestão de Energia – SGE é caracterizado como um conjunto de elementos que se relacionam ou interagem para estabelecer uma política energética e objetivos energéticos, e processos e procedimentos para atingir tais objetivos (ABNT, 2011).

O objetivo da ISO 50001 é permitir que as organizações determinem os sistemas e processos necessários para o otimizar o desempenho energético, incluindo a eficiência energética, uso e consumo. A implantação desta norma visa à redução na emissão de gases de efeito estufa, dentre outros impactos de natureza ambiental relacionados à energia e aos custos que este sistema de gestão energética poderá acarretar (ABESCO, 2016).

Esta norma pode ser aplicada a todos os tipos e tamanhos de organizações, independente de condições culturais, sociais ou geográficas. A implantação bem efetuada dependente somente do comprometimento de todos os níveis e funções

do empreendimento, principalmente do comprometimento da alta direção (ABNT, 2011).

A Norma ISO 50001 baseia-se na metodologia de melhoria contínua, o ciclo PDCA, do inglês, *Plan-Do-Check-Act*, que incorpora a gestão de energia às práticas diárias das organizações, conforme a figura 5.

No âmbito da Gestão da Energia, a abordagem PDCA pode ser descrita da seguinte maneira (ABNT, 2011; AIDA, 2014; SILVA, 2013b):

a) *Plan (planejar)*: realizar a avaliação (revisar) energética e estabelecer a linha de base, os indicadores de desempenho energético (IDE), objetivos, metas e planos de ação necessários para produzir resultados que possibilitaram a melhoria do desempenho energético de acordo com a política de energia da organização;

b) *Do (fazer)*: implantar os planos de ação de gestão de energia, incluindo procedimentos e processos, com o objetivo de melhorar o desempenho energético;

c) *Check (verificar)*: monitorar e medir os processos e produtos, as características chave das operações que determinam o desempenho energético face à política energética e aos objetivos, e relatar os resultados;

d) *Act (agir)*: empreender ações que visem melhorar continuamente o desempenho do SGE face aos resultados atingidos.

Na figura 3 é apresentado o modelo de gestão de energia da ISO 50001, evidenciando as fases dos ciclo PDCA anteriormente descritas.

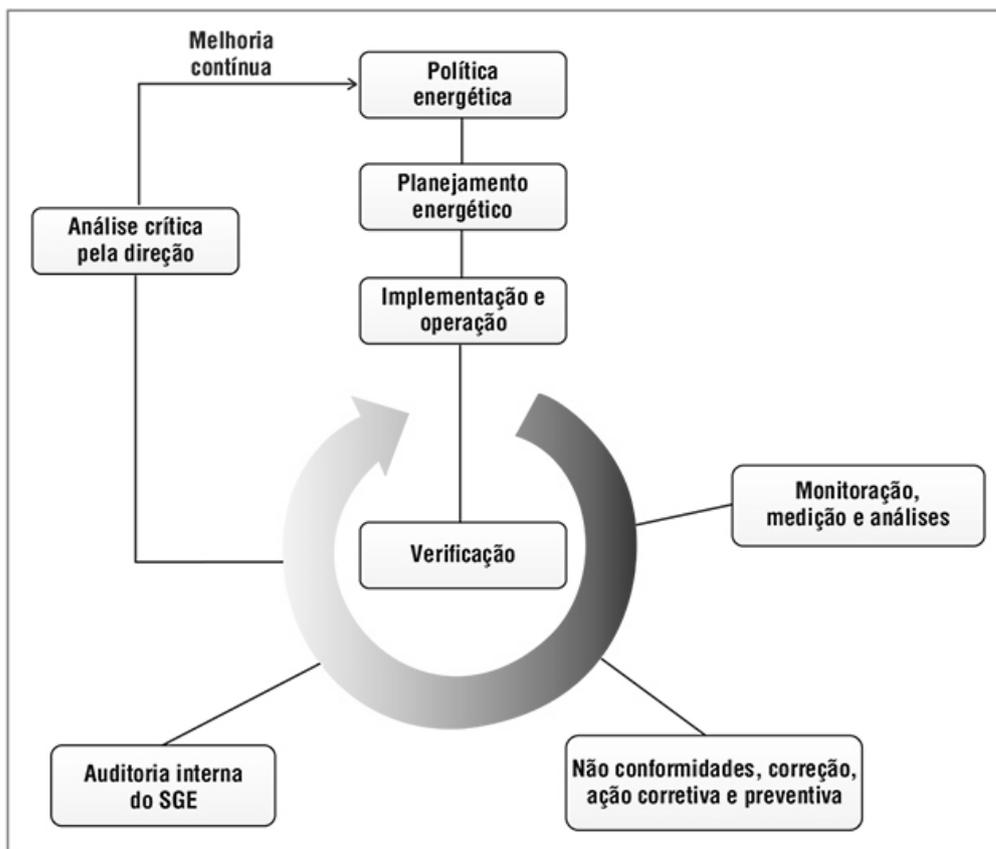


Figura 3: Modelo de Sistema de Gestão de Energia da ISO 50001:2011.
Adaptado de ISO 50001.

Segundo a ABNT (2011) o uso desta ferramenta de gestão contribui para o uso mais eficiente das fontes energéticas disponíveis, para maior competitividade e para diminuição de emissões de gases de efeito estufa e de outros impactos ambientais. Esta norma é aplicável a todos os tipos de energia utilizados. O quadro 4 a seguir apresenta as vantagens e desvantagens de um Sistema de Gestão Energética segundo a ISO 50001.

Quadro 4: Vantagens e desvantagens da implementação de um Sistema de Gestão Energética (SGE) conforme a ISO 50001.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
<p>- Controle sobre a coleta de dados energéticos;</p> <p>- Avaliação dos processos produtivos e organizacionais, para além das instalações e equipamentos;</p> <p>- Monitoramento dos resultados obtidos com a implementação de medidas de melhoria do desempenho energético, e sempre que necessário, adoção de medidas corretivas;</p> <p>- Otimização do sistema de gestão de energia da organização ao longo do tempo, numa perspectiva de melhoria contínua;</p> <p>- Envolvimento de toda a organização no processo, potenciando a obtenção de resultados duradouros.</p>	<p>- Planeamento envolvido num sistema de gestão de energia é complexo e demorado;</p> <p>- Controle de custos decorrentes da implementação do sistema de gestão de energia exige particular atenção por parte da gestão de topo.</p>

Fonte: Adaptado de AIDA (2014).

No geral, em uma perspectiva de médio e longo prazo, os principais benefícios para as organizações resultantes da implementação de um SGE estão relacionados à redução do consumo de energia e a melhorias na eficiência e produtividade dos processos, acarretando, assim, na racionalização dos custos com a energia. E, ainda, gerando melhorias no desempenho ambiental das organizações. A implantação de um SGE segundo a ISO 50001 gera benefícios às organizações, sendo elas, conforme AIDA (2014):

- A redução à fatura energética das organizações;
- O aumento a produtividade das organizações;
- O aumento a competitividade nos mercados internos e externos;
- O conhecimento de forma aprofundada as instalações e o custo energético dos processos;
- A contribuição para uma melhoria na imputação dos custos operacionais e consequente planeamento de custos;

- A contribuição para a redução dos impactos negativos decorrentes do consumo de energia, incluindo a redução de gases com efeitos de estufa;
- A redução a exposição das entidades a fatores externos.

A ISO 50001 propõe um esboço para a obtenção de melhorias no desempenho energético das organizações. Desempenho energético está relacionado ao uso e consumo de energia e eficiência energética, como ilustrado na figura 4.

Segundo Silva (2013b) estes três componentes (à redução do consumo de energia e a melhorias na eficiência e produtividade dos processos) devem ter prioridade no SGE para obter sucesso no desempenho energético dos processos.



Figura 4: Representação conceitual de desempenho energético.
Fonte: Adaptado de ISO (2011).

Com esta representação, uma organização tem liberdade para identificar as possíveis perdas no processo produtivo e, assim, planejar e adotar ações que potencializem o próprio desempenho (SILVA, 2013b). Como exemplo, uma organização pode: “reduzir a demanda de pico, utilizar excedentes de energia ou resíduo energético, ou melhorar as operações de seus sistemas, processos ou equipamentos” (ABNT, 2011, p. 15).

Além da perspectiva do desempenho energético, tem-se o lado processo gerencial do sistema produtivo. Sola (2006) destaca a importância do papel estratégico dos insumos energéticos na produção, interferindo direta e positivamente no desempenho de uma empresa através: do gerenciamento de contratos com fornecedores de energia e o sistema de tarifas; no monitoramento de perdas energéticas, do uso e qualidade de energia, principalmente da energia elétrica; e de tecnologias mais eficientes energeticamente.

Na implantação de SGE é importante ter o aspecto gerencial pois, se trata de uma ferramenta estratégica, capaz de auxiliar e identificar potenciais melhorias energéticas numa empresa.

Assim, é possível atuar na correção de falhas, na redução de desperdícios de energia e, selecionar e acionar o mecanismo mais adequado, com bases técnicas (indicadores de eficiência energética), visando a avaliação da eficiência e desempenho energéticos em uma organização.

3.8

Indicadores de eficiência energética

O uso de indicadores aplicados à análise de eficiência energética tem se elevado no Brasil e no mundo, sendo de grande importância em organizações. Os resultados obtidos a partir da avaliação de indicadores de eficiência energética estão relacionados a atividades de planejamento estratégico, tecnologia e gestão ambiental e de conservação de energia (TAVARES e MONTEIRO, 2014).

Segundo Capelli (2007) *apud* Caneppele (2011) para se obter uma boa eficiência energética são necessários, essencialmente, cinco fases:

- Compreender o consumo atual de energia;
- Entender como é cobrado;
- Identificar oportunidades de economia de custos com ações de eficiência;
- Elaborar um diagnóstico e um plano executivo;
- Verificar, por meio de indicadores ou medição direta, a redução da demanda ou o consumo de energia elétrica.

Com estas fases, no âmbito da avaliação de indicadores, é possível observar a correlação entre a eficiência energética e os recursos consumidos. Elas associam-se, sobretudo, a fatores econômicos e político-ambientais em uma organização (TAVARES e MONTEIRO, 2014).

A análise dos indicadores de eficiência energética pode servir de base para a definição de normativas importantes numa empresa, tais como (CANEPPELE, 2011; MONTEIRO, 2013; TAVARES e MONTEIRO, 2014; SAIDEL, FAVATO e MORALES, 2005):

- Direcionar mudanças no consumo energético;
- Estabelecer políticas de eficiência energética;
- Indicar limitações estruturais que impactam a melhora na eficiência energética;
- Substituir processos tecnológicos;
- Alterar o uso e a escolha das matérias-primas que são utilizadas na produção ou nos processos de produção que reduzem a demanda de energia do processo;
- Servir de ferramenta na avaliação de metas para políticas ambientais voltadas para reduções de emissões gasosas;
- Indicar os impactos estruturais para melhorar a eficiência energética;
- Orientar o estabelecimento de preços de energia (tarifas energéticas).

Uma das maneiras de apresentar dados pertinentes à eficiência energética é através de indicadores (GUERREIRO *et al.*, 2006), os quais na concepção de Cima (2006) são valores estatísticos que apresentam o estado específico e determinado no tempo de um fenômeno notável e estimável.

Indicadores de uso de energia e de eficiência fornecem informações para a tomada de decisões políticas e apoiam o desenvolvimento de mecanismos e ações específicas (APEREC, 2001). Podem ainda ser utilizados no monitoramento de impacto de programas ou iniciativas, bem como facilitar a comparação entre

diferentes economias ou regiões (CANEPPELE, 2011; GUERREIRO *et al.*, 2006).

Segundo a ABNT ISO 50001/2011 “uma organização deve identificar os indicadores de desempenho energético – IDEs apropriados para monitoramento e medição de desempenho energético”. O método a ser aplicado deverá determinar, atualizar, registrar e manter os IDEs constantemente revisados e comparados às linhas de base energética, sempre que necessário (ABNT, 2011).

Os IDEs podem ser uma simples razão, ou parâmetro, ou por modelo de maior complexidade. As organizações podem incluir alguns exemplos de IDEs, tais como: consumo de energia em função do tempo, consumo de energia por unidade de produção e modelos multivariáveis (AIDA, 2014).

Segundo Carvalho (2014) deve-se utilizar indicadores para energia elétrica como uma ferramenta importante para produção de diagnóstico energéticos. Por meio da análise de um conjunto de indicadores, é possível avaliar o perfil de consumo, possibilitando um estudo das particularidades de consumo da unidade.

Neste sentido, Borges (2009), Caneppele (2011), Carvalho (2014), Eletrobrás (2008), Endo *et al.* (2011), EPE (2012) apontaram e utilizam os seguintes indicadores de energia:

3.8.1

Fator de potência

O fator de potência (FP) é a razão entre energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa (ou energia aparente), consumidas num mesmo período. O grau de utilização de potência ativa, a que realiza trabalho, varia de zero a um, esse fator indica se é indutivo ou capacitivo.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

Onde:

Potência ativa (P) é medida em (W);

Potência reativa (Q), medida em var (volt-ampere reativo).

O excesso de potência reativa sobrecarrega o sistema elétrico devido a necessidade de uma maior geração para atender as potências ativas instaladas. É possível uma maior eficiência do sistema elétrico com a redução da potência reativa, elevando o fator de potência, possibilitando um aumento de potência ativa sem a ampliação de sua capacidade instalada. Existe uma cobrança associada a potência reativa por parte da concessionária, justificada pelo fato da necessidade de um maior dimensionamento do sistema para atender a essa carga.

3.8.2

Fator de carga

O fator de carga (FC) é a razão entre a demanda média e a demanda máxima da unidade consumidora, ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado. Esse indicador possibilita a verificação de quanto a energia elétrica é usada de forma eficiente. Sua variação é de zero a um, quanto mais próximo de um mais eficiente é a unidade. A melhora no fator de carga pode ocorrer quando a demanda é reduzida e o consumo se mantém, ou elevando o consumo ao patamar adequado ao da demanda. A demanda média é obtida pela razão entre energia total consumida (kWh) no intervalo de tempo e seu número de horas (h), como mostrado na equação a seguir:

$$FC = \frac{D_{média}}{D_{máx}} \quad (2)$$

$$FC = \frac{\left(\frac{E_{total}}{N_{horas}}\right)}{D_{máx}} \quad (3)$$

Onde:

$D_{média}$: demanda média (kW);

$D_{máx}$: demanda máxima (kW);

E_{total} : é a energia total consumida no intervalo de tempo em (kWh);

N_{horas} : é o número de horas desse intervalo.

Este indicador é o mais importante para verificar se a energia elétrica de uma unidade é eficiente em relação a sua capacidade instalada. Um baixo índice de fator de carga adverte sobre concentração de consumo em um pequeno espaço de tempo e subutilização das instalações nas horas restantes.

3.8.3

Fator de demanda

O fator de demanda é definido como a razão entre a demanda máxima num intervalo de tempo especificado e a carga instalada na unidade consumidora:

$$FD = \frac{D_m}{P_i} \quad (4)$$

onde:

FD = Fator de demanda.

D_m = Demanda máxima da instalação, em [kW].

P_i = Potencia nominal dos equipamentos instalados na planta industrial, em [kW].

3.8.4

Demanda

A demanda garante o equilíbrio entre a oferta e a demanda, o que é um dos grandes desafios. Do lado da oferta, foram feitos esforços para melhorar a eficiência. Pelo lado da demanda, é possível aplicar instrumento de controle em tempo real da demanda. Além de medir alguns instrumentos são capazes de priorizar cargas em prol de outras e fazer o desligamento das mesmas à medida que atingem determinado patamar. Esse controle também pode ser realizado através de uma rede inteligente que tenta otimizar o fluxo de eletricidade usando o controle remoto baseado em computador e automação (Zhou et al. 2010; Mah et al. 2012).

3.8.5

Indicadores de Qualidade

Os indicadores de qualidade dividem-se em dois tipos: qualidade do serviço e qualidade do produto.

A qualidade do serviço está relacionada às interrupções de fornecimento a que um consumidor está sujeito:

a) Duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC): intervalo de tempo que em cada unidade consumidora ou ponto de conexão ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica.

b) Frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC): número de interrupções ocorridas, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

c) Duração Máxima de Interrupção contínua por unidade consumidora (DMIC): tempo máximo de interrupção contínua de energia elétrica, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão.

A qualidade do produto se refere ao produto “tensão” entregue pela distribuidora ao consumidor:

d) Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária. (DRP)

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (5)$$

e) Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica. (DRC)

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (6)$$

As variáveis nlp e nlc representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente.

f) Harmônico

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

3.9

Smart grid

Segundo Vidal e Batista (2014), *Smart grid* – SG é um conceito ainda em processo de desenvolvimento, o qual aos poucos está se tornando realidade no cenário elétrico mundial.

A origem do termo *Smart Grid* é controversa. Uma linha de autores apontam que termo foi usado pela primeira vez em 2003, no artigo “*Reliability demands will drive automation investments*”, visando a redução de pontos fracos do sistema elétrico, tais como: ineficiência e falhas operacionais, por meio da capacidade de transmitir dados e sistemas de controle a rede. Outros autores dissertam que o termo foi apresentado no ano de 1998 (PETENEL, 2014).

Outra linha de autores aponta que o termo SG surgiu em 2005, no artigo intitulado “*Toward A Smart Grid*”, publicado na revista *IEEE Power & Energy*, pelos autores S. M. Amin e B. F. Wollenberg (2005). No qual tratou o tema com o objetivo de adicionar processamento nos equipamentos do sistema elétrico aliado à comunicação.

Esse novo conceito de rede elétrica inteligente muda os paradigmas do Setor Elétrico. Existem diversas definições de conceito que varia de acordo com a visão escolhida, por exemplo: ambiental, socioeconômico ou político-regulatório (RIVERA, ESPOSITO, TEIXEIRA, 2013).

Amin e Wollenberg (2005) definiram SG como “uma infraestrutura de rede elétrica em larga escala caracterizada por segurança, agilidade e resiliência/robustez que enfrenta novas ameaças e condições não previstas”.

Os elementos da rede poderiam se comunicar e colaborar de forma a se autoconfigurar em caso de novo agente (*plug and play*) ou de necessidade de correção. Nesse sentido, a perspectiva do administrador da rede de energia se

mantem, com o cuidado voltado para a automação e eficiência do sistema (RIVERA, ESPOSITO, TEIXEIRA, 2013).

Como explanado, existem várias definições para o conceito de redes inteligentes, entretanto todas tendem ao uso de elementos digitais e de comunicações nas redes que transportam a energia. Esses componentes permitem o envio de uma gama de dados e informação para os centros de controle, onde eles são tratados, auxiliando na operação e controle do sistema como um todo (MME, 2010).

Smart grid está relacionado à junção de tecnologias de computação, automação e comunicação aplicadas no monitoramento, controle e manutenção da rede elétrica, de forma a possibilitar o fornecimento de energia elétrica com maior qualidade e sustentabilidade e elevando o nível de segurança e confiabilidade (FALCÃO, 2010).

Em outras palavras, é uma rede elétrica com elevada integração de tecnologia de informação, telecomunicações, sensoriamento/medição e automação, de forma a aumentar consideravelmente sua capacidade de atender cenários com fontes intermitentes e distribuídas de energia, elevada confiabilidade, baixo impacto ao meio ambiente e adequada a novos mercados de energia (FALCÃO, 2012).

Apesar disto, para que esse conceito seja prático, são necessárias alterações na rede atual, uma vez que, como apontado por Falcão (2009) que os sistemas elétricos ainda são totalmente anacrônicos e com potencial para causar grandes danos à sociedade. Tais alterações seriam realizadas com instalação de sensores, dispositivos para comunicação em tempo real, centrais de processamento de dados, e ainda, mudanças na forma de comercialização da energia (MME, 2010).

Dentre as características desejáveis de uma SG tem-se a autorrecuperação (*self-healing*), a possibilidade do gerenciamento pelo lado da demanda e a resistência a ataques físicos e cibernéticos. As principais funções da SG são: motivar a participação de consumidores, fornecer energia de boa qualidade, integrar diferentes tipos de geração e armazenamento de energia, e possibilitar maior envolvimento do mercado (AMIN e WOLLENBERG, 2005; MME, 2010; PÉRES, CAMPOS e LIANG, 2014; VIDAL e BATISTA, 2014).

O principal desafio na implantação de uma SG é o acoplamento de uma adequada infraestrutura de comunicação ao sistema elétrico, planejada para suportar operações de controle e interação entre centros de controle e subestações individuais e capazes de integrar monitoramento e controle dos mais variados dispositivos e fontes distribuídas (SUP, 2012).

Assim, Falcão (2010) destaca que a transformação da rede de energia elétrica atual para a SG deverá adicionar novas tecnologias de automação, computação e comunicações às partes da rede elétrica, formando-se bolsões de sub-redes com as particularidades da SG. Tais bolsões de sub-rede são denominados *Smart Microgrid* – MG (microrredes inteligentes), caracteriza-se na aplicação de conceitos de SG a uma microrregião (ALVIAL-PALAVICINO *et al.*, 2011).

A eficiência energética é o principal foco de uma rede e microrrede elétrica inteligente. É através do autogerenciamento que a rede visa o controle do consumo da energia de forma ideal, minimizando perdas desde a geração a distribuição e, na redução do carregamento durante os horários de pico (ARAÚJO *et al.*, 2011; AMARAL, 2014). Um sistema inteligente se torna mais eficiente pelo fato de tomar decisões em tempo real, utilizando a energia de modo racional (ARAÚJO *et al.*, 2011).

3.9.1

Smart Microgrid

O termo *Smart Microgrid* – MG ou *Microgrid* é aplicado para determinar um conjunto de cargas e geradores interligados, configurando um sistema elétrico controlado, podendo ser operado por conta própria, ou seja, de forma autônoma ou ainda, interligado a uma rede elétrica convencional (MATOS, 2014). No início, microgrids eram tratadas como subsistemas elétricos, com potências nominais inferiores a 100 kW e que operavam sempre em baixa tensão (PIAGI e LASSETER, 2006).

Hoje em dia, a terminologia *microgrid* tem sido utilizada de forma abrangente, visando designar uma célula controlada do sistema de potência convencional, podendo funcionar de forma interligada ou separada deste, sem a

necessidade de quantificá-la quanto à potência nominal e a tensão de operação da própria. Em Barnes et al. (2007) isto fica bem evidente, em que vários sistemas elétricos são tratados como MG, mesmo sendo alguns deles de potência nominal superior a 1 MW e operando em média tensão, 13.200 kV.

Uma MG deve ser entendida como mais um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico, não é possível abrir um catálogo comercial e comprar uma MG. Entretanto, é possível agrupar tecnologias e construir uma para atender determinadas necessidades (SUP, 2012).

As MGs devem ser utilizadas de forma inteligente no gerenciamento e controle de diversos dispositivos que constituem um sistema. Normalmente a configuração das redes elétricas é feita por técnicos da área, que se deslocam até os equipamentos e dispositivos e os configuram manualmente para satisfazer às necessidades dos usuários. Isto acarreta em oneração operacional, uma vez que, para cada configuração realizada nestas condições, é necessário o deslocamento do técnico ao local em que estão instalados os dispositivos e equipamentos (SAMPAIO JÚNIOR, 2012).

Tendo isto, o MG é uma solução inteligente para a configuração dos dispositivos em redes elétricas, possibilitando o controle autônomo e comunicação remota com os dispositivos. Estes são utilizados em sistemas que, geralmente, possuem módulos de comunicação e processamento, fornecendo uma área de comunicação e possibilitando a adição de inteligência aos dispositivos e, por conseguinte, a todo o sistema (OLIVEIRA e VIEIRA JÚNIOR, 2012; SAMPAIO JÚNIOR, 2012).

Quanto ao gerenciamento de MG, Tiggermann (2015) lista as principais vantagens trazidas por este conceito:

- Melhor aproveitamento da energia armazenada no banco de armazenamento, sendo disponibilizada para cargas que realmente são prioritárias;
- Possibilidade de alteração do perfil de fornecimento baseado em informações de previsão do tempo e, conseqüentemente, produção energética com fontes renováveis;

- Controle e monitoramento instantâneo de todas as fontes geradoras do sistema e de todo o consumo por unidade consumidora (caso tenha medidores individualizados);
- Histórico das variáveis mais importantes do sistema, visando futuras estatísticas e melhoramentos no sistema.

Adicionalmente, deve-se colocar que o MG permite um melhor gerenciamento da demanda e, assim, contribuindo para redução dos recursos utilizados.

3.9.2

Indicadores de Inteligência

Para a escolha dos indicadores de inteligência de rede foram realizadas reuniões com especialistas, e técnica de *brainstorming*. Foram elencados 4 indicadores:

- **Supervisão e Controle:** A subestação inteligente fornece uma plataforma única e compatível para rápida e confiável detecção, medição, comunicação, controle, proteção e manutenção de todos os equipamentos e aparelhos instalados em uma variedade de subestações.
- **Autonomia:** A subestação inteligente é autônoma. A operação da subestação inteligente não depende dos centros de controle e outras subestações, mas eles podem se comunicar uns com os outros para aumentar a eficiência e a estabilidade de transmissão de energia.
- **Coordenação:** A subestação inteligente deve estar pronto e fácil para se comunicar e coordenar com outras subestações e controle de centros. Adaptação de sistemas de proteção e controle deve ser alcançada sob coordenação dos centros de controle para melhorar a segurança da rede elétrica toda.

- ***Self-Healing***: A subestação inteligente é capaz de reconfigurar-se dinamicamente para se recuperar de ataques, desastres naturais, desmaios ou falhas de componentes de rede.

Para a análise dos indicadores de inteligência utilizou-se o conhecimento e da experiência de especialistas nos temas abordados.

4

Metodologia

A metodologia proposta tem como objetivo contemplar os seguintes itens:

- Estudo das subestações dentro de um parque industrial de grande porte;
- Condições de máquinas e equipamentos, condições das instalações elétricas, características do uso da energia elétrica e políticas de eficiência energética;
- Estabelecimento e a atualização de fatores e índices de eficiência energética para a atividade industrial;
- A metodologia de projeto de dos sistemas de apoio à decisão utilizando o método AHP e o TOPSIS na sua construção e desenvolvimento.

4.1

Levantamento de Dados

Foram levantados dados de 4 subestações, essa escolha se deu pelo fato dessas subestações serem mais modernas que as demais, permitindo assim a ligação do medidor sem o desligamento de equipamentos. O analisador de redes de energia Power net P600 foi conectado na entrada do fornecimento de energia das subestações conforme mostra a figura 5. Além disso, foram coletados dados do consumo total de energia elétrica que são listados nas tabelas de 1 a 4 do Apêndice 1.



Figura 5: Analisador Portátil Power Net P600 ligado em rede trifásica junto a entrada de energia na subestação 1.

4.2

Definição de indicadores

Na literatura há muitas definições acerca de indicadores. Ferreira, Cassiolato e Gonzalez (2009) sustentam que:

“O indicador é uma medida, de ordem quantitativa ou qualitativa, dotada de significado particular e utilizada para organizar e captar as informações relevantes dos elementos que compõem o objeto da observação. É um recurso metodológico que informa empiricamente sobre a evolução do aspecto observado.”

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008), os indicadores são ferramentas construídas de variáveis que, relacionadas de formas distintas, podem expor e circundar significados mais completos sobre os elementos aos quais são referidos.

Os indicadores podem ser ainda classificados de acordo com diferentes momentos do ciclo de gestão, a saber, a partir do entendimento das funções supracitadas dessas funções (CRIOLLO, 2016):

- **Ex-ante:** antes da situação, dando suporte à definição do problema, ao desenho de uma política e estabelecimento das referências que se quer alterar;
- **In curso:** para o monitoramento e avaliação da situação, enquanto ela ocorre, revisão do planejamento inicial e correção das falhas e desvios;
- **Ex-post:** para avaliação do alcance de metas, resultados e impactos na sociedade.

A definição dos critérios de seleção, ou seja, aqueles que servirão de apoio para incluir ou descartar indicadores conforme os objetivos podem ser de dois tipos, de acordo com Villela et al. (2007):

- **Critérios eliminatórios:** devem ser obrigatoriamente atendidos pelo indicador candidato, tendo que ser descartado caso não atenda. Foi considerado como critérios eliminatórios os índices DIC, FIC e DMIC, pois para iniciar qualquer análise é necessário garantir que o mínimo de qualidade de energia está sendo atendido pela distribuidora. Esses critérios não são considerados critérios de eficiência, mas contribuem de forma significativa para análise inicial de qualidade de energia entregue pela distribuidora;
- **Critérios classificatórios:** usados para hierarquização dos indicadores, a partir de uma análise quantitativa ponderada.

Para a análise dos indicadores de qualidade, que neste trabalho foram considerados eliminatórios, foram utilizados os valores de referência das contas de energia dos 12 últimos meses demonstrados na tabela 1.

Tabela 1: Indicadores eliminatórios de qualidade: DIC, FIC e DMIC.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
DIC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meta mensal	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
FIC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meta mensal	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
DMIC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meta mensal	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

Quando aplicável, deverão ser definidas outras normas específicas e úteis ao conceito a ser medido. Para instrumentalizar a aplicação dos critérios

classificatórios, é preciso definir (i) o grau de atendimento dos indicadores aos critérios estabelecidos; (ii) atribuição de pesos aos critérios classificatórios, que podem variar (CRIOLLO 2016).

Indica-se como boa prática a utilização do conhecimento e da experiência de especialistas nos temas abordados. Outras práticas, que foram adotadas durante as reuniões com os especialistas, foram o uso da técnica de brainstorming e grupos focais.

A “Matriz de avaliação quantitativa de indicadores” no domínio desta pesquisa, optou-se pelas escalas sugeridas pelos autores de dois métodos multicritério de apoio à decisão, como será apresentado adiante. A ferramenta apresentada permite que os indicadores sejam organizados em forma de um *ranking*, em ordem decrescente de pontos obtidos, em conformidade com o atendimento aos critérios pré-definidos.

A ferramenta multicritério de apoio à decisão escolhida TOPSIS, que foi aplicada a “Matriz de avaliação quantitativa de indicadores”. Após isso a segunda análise a ser realizada é a qualitativa. A partir do *ranking* estabelecido pela “Matriz de avaliação quantitativa de indicadores”, o gestor deve optar entre os indicadores de maior classificação, ou seja, aqueles que melhor expressam os resultados esperados pela opção em questão (CRIOLLO, 2016).

Os critérios utilizados geralmente são subjetivos, segundo experiências anteriores; opinião especializada; comparação com outros sistemas; e quaisquer outras fontes consideradas relevantes.

Considerando-se ainda a perspectiva de melhoria contínua ressalta-se que a análise qualitativa pode (i) verificar indicadores candidatos inicialmente ideais, mas que terminaram mal classificados ou mesmo eliminados pela análise quantitativa; (ii) checar as razões pelas quais esses indicadores foram reprovados e quais os critérios que não foram atendidos; (iii) realizar um plano de ação para excluir as restrições de uso desses indicadores; e (iv) comprometer-se na revisão dos indicadores, para que esses indicadores ideais possam ser aprovados e operacionalizados em um ciclo seguinte.

O passo seguinte refere-se à validação dos indicadores selecionados. Nesse passo, realiza-se uma verificação final da conformidade e pertinência dos indicadores, conforme o atendimento aos requisitos, optando pela seguinte lista de

verificação: (i) os indicadores escolhidos são válidos para expressar os resultados esperados?; (ii) são originários de fontes confiáveis?; (iii) são mensuráveis?; (iv) são em quantidade suficiente para expressar as dimensões envolvidas? (CRIOLLO, 2016).

Além disso, em concordância com as respostas, é necessário examinar a pertinência dos indicadores selecionados ou revisar seu modelo lógico.

4.3

Métodos multicritério de apoio à decisão

No contexto atual da sociedade, a tomada de decisão, no qual a competitividade é intensa e exige que os gestores utilizem instrumentos eficientes e flexíveis, é um dos grandes desafios apresentados a executivos e líderes, seja do setor público, seja do setor privado. Tal desafio torna-se complexo, uma vez observada à existência de variáveis subjetivas (inerentes do ser humano de maneira geral) e julgamentos de valor. Os métodos multicritério de apoio à decisão (MMAD) têm o objetivo de proporcionar a modelagem para a solução de problemas de gestão, caracterizando-se como um instrumental relevante e de uso crescente nos ambientes organizacionais (COSTA, 2006).

4.3.1

Métodos Utilizados

MMAD trata-se de um conjunto de técnicas desenvolvidas para auxiliar um decisor a analisar um problema complexo, de resolução trabalhosa e com distintas alternativas de solução, de acordo com determinados critérios (Sousa Junior e Mendes, 2014). Os instrumentos devem ter habilidades para tratar eventuais adversidades; com simplicidade, para que sejam acessíveis aos decisores, sem que eles tenham que empregar excesso de tempo e dinheiro para utilizá-los (Costa, 2006).

Há diversos MMAD, entretanto, os mais utilizados são “Utilidade Multiatributo”, “Processo Analítico Hierárquico” (sigla em inglês, AHP); *Elimination et Choix Traduisant la Realite* (ELECTRE) é a “Técnica para avaliar

o desempenho de alternativas através de similaridade com a solução ideal” (sigla em inglês, TOPSIS) (Gomes e Freitas Junior, 2000).

Na fase de pesquisa aplicada, cujos resultados serão exibidos no capítulo 6, foram utilizados dois dos métodos listados, o “Processo Analítico Hierárquico” (AHP) e a “Técnica para avaliar o desempenho de alternativas, através de similaridade com a solução ideal” (TOPSIS).

4.3.2

Processo Analítico Hierárquico (AHP)

O método AHP foi proposto por Saaty nos anos 1970, sendo um dos métodos de AMD mais populares e usados. É uma das ferramentas de apoio multicritério para a tomada de decisão que revela o maior número de aplicações práticas presentes na literatura, tais como engenharia, educação, indústria e setores do governo, para desvendar problemas pertinentes à seleção e avaliação subjetiva de alternativas (Dutra e Fogliatto, 2007).

A decomposição e a síntese das relações entre critérios são os fundamentos do método AHP que possibilita chegar a uma priorização dos critérios, que estarão mais próximos para a convergência à melhor resposta de medição única (Saaty, 1977; 1990; 1991; 2000). Resumidamente, a essência da teoria está centrado no estudo de sistemas a partir de uma série de comparações aos pares. Saaty considera que este é o método natural de funcionamento porque a mente humana tem a mesma atividade: frente a um grande número de elementos, ela executa comparações e os agrupa conforme determinada propriedade, repetindo esse processo para outros níveis, até atingir seu máximo, quando a repetição representa o objetivo do processo decisório, revelando, então, uma hierarquia. Através de comparações por pares, diz Saaty (1991), é a forma mais racional para realizar os julgamentos porque assim as prioridades calculadas pelo método irão capturar tanto as medidas subjetivas, quanto as objetivas, revelando fielmente a intensidade de domínio de um determinado critério (ou alternativa) em relação ao outro.

Utilizar o método é eficaz nas tomadas de decisões, porque minimiza os seus defeitos e, como são realizados julgamentos de comparações pareadas

ancoradas em experiência, intuição e dados reais, trata dos aspectos quantitativos e qualitativos de um determinado problema (Saaty, 1991).

Para melhor elucidar, o método AHP converte o problema maior em avaliações mais compreensíveis e de menor relevância, mantendo, portanto, a participação desses últimos na decisão global. Ou seja, a situação-problema é dividida em partes menores e quando forem solucionadas, uma a uma (posteriormente somados), devem representar a decisão a ser tomada para a resolução do problema inicial.

Segundo Costa (2006), o método está sustentado em três princípios do pensamento analítico:

- Construção de hierarquias, que reflete o momento em que o problema é organizado a partir de níveis hierárquicos, possibilitando ser mais bem assimilado e avaliado. Caracteriza uma etapa importante do raciocínio humano no qual estão identificados os elementos chave para a tomada de decisão;
- Definição das prioridades, fundamentada na capacidade de relacionamento do ser humano, com objetos ou situações observadas, equiparadas aos pares em relação a um determinado foco ou critério;
- Consistência lógica, que pode ser avaliada depois de aplicado o método.
- O método AHP concebe quatro etapas, segundo a descrição de Saaty (1991) e Costa (2006). A descrição detalhada do método AHP encontra-se no Anexo 1.

4.3.3

Técnica para avaliar o desempenho de alternativas pela similaridade com a solução ideal (TOPSIS)

A técnica para examinar o desempenho de opções pela similaridade com a solução ideal (em inglês, *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* ou TOPSIS) foi introduzida por Hwang e Yoon, em 1981. Desde então, vem sendo aplicada por pesquisadores de áreas distintas, como, por exemplo, gestão da cadeia de suprimentos, design e sistemas de produção, gestão ambiental

e de saúde. O método se vale de uma análise de entropia na definição dos pesos utilizados.

Uma série de características fazem com que a técnica TOPSIS seja a ferramenta de escolha para a solução de múltiplos problemas, destacados por Amiri *et al.* (2010):

- Autoriza a inclusão de um número ilimitado de propriedades e atributos;
- Permite, da mesma forma, trabalhar dentro de contextos específicos, nos quais cada atributo não pode ser avaliado individualmente e sim como uma troca em relação a outros;
- Estabelece as alternativas através de escores, o que facilita o entendimento das diferenças e similaridades entre elas;
- Implementa em planilha eletrônica, facilitando a sua utilização.

Assim, com essa técnica, a melhor alternativa seria aquela mais próxima da solução ideal positiva (*Positive Ideal Solution* ou PIS) e a mais distante da solução ideal negativa (*Negative Ideal Solution* ou NIS). A solução ideal positiva é composta por todos os melhores valores atingíveis em relação a cada critério. Todavia, a solução ideal negativa, evidencia os piores valores atingíveis em relação a cada critério de decisão (Hwang e Yoon, 1981).

A descrição detalhada do método TOPSIS encontra-se no Anexo 2.

4.4

Considerações finais sobre o capítulo

Os indicadores são formas quantificáveis de se representar características de produtos e processos. Os efeitos das ações devem ser aferidos de alguma forma, de modo que o gerenciamento do sistema seja realizado de forma eficaz. Os indicadores consentem avaliar resultados positivos e negativos, servem de base para uma decisão, verificam posição em relação às metas, melhoram processos, medem desempenho, entre diversas outras funções. Os indicadores devem ser bem definidos, acompanhados sistematicamente para tomada de decisão e aplicáveis ao que de fato for relevante para serem utilizados da melhor maneira possível (CRIOLLO, 2016).

Destacaram-se neste capítulo a metodologia para elaboração do modelo lógico. Cabe ressaltar que o método para construção da matriz de indicadores foi concebido para dar suporte à definição de indicadores e métricas para avaliar o desempenho do sistema em questão.

A parte final do capítulo abordou métodos multicritério de apoio à decisão, para fins de opção daqueles a serem adotados na fase de pesquisa aplicada, sobretudo na definição de pesos dos critérios para classificar indicadores candidatos e na etapa final de hierarquização dos indicadores selecionados para monitorar e avaliar a Eficiência e inteligência de uma rede (CRIOLLO, 2016).

Os métodos quantitativos multicritério de apoio à decisão têm sido empregados em uma série de aplicações, de acordo com o comentário da seção 4.3. A partir de uma visão comparativa de seis métodos, o AHP, desenvolvido por Thomas A. Saaty, em 1977, e a ferramenta TOPSIS, proposta por Hwang e Yoon, em 1981, mostraram-se os mais apropriados para aplicação nas referidas etapas da fase de pesquisa aplicada deste trabalho.

O método adotado, na etapa de definição dos pesos dos critérios classificatórios para hierarquização final dos indicadores, será o AHP. A técnica TOPSIS, por outro lado, será aplicada para a hierarquização final dos indicadores. Finalmente, considera-se que a integração dos métodos AHP e TOPSIS à metodologia possam cooperar para a avaliação do sistema atual.

5

Resultados

O *Microgrid* considerado na pesquisa, abrange um conjunto de 4 subestações dos Estúdios Globo, como apresentado a seguir na figura 6.

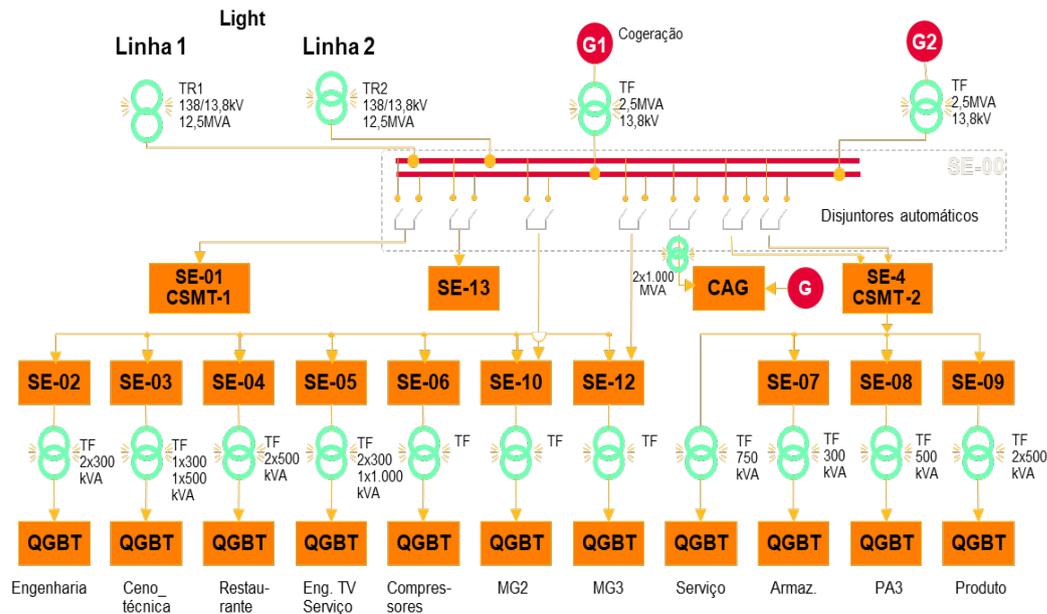


Figura 6: Apresentação do Microgrid da Pesquisa – Diagrama unifilar.

O Sistema apresentado possui: demanda atual: **8,5 a 9,5 MVA**, sendo a capacidade atual da Cogeração: **2 x 2,5 MVA**. Para facilitar a identificação das subestações (SE) durante esse trabalho, renomearemos da seguinte forma as subestações contidas na figura 7:

- SE-01 = SE-09
- SE-02 = SE-07
- SE-03 = SE-06
- SE-04 = SE-04



Figura 7: Mapa das Subestações dos Estúdios Globo.

Este capítulo tem por objetivo relatar e discutir os resultados da fase aplicada da pesquisa até a proposição de um conjunto de indicadores para hierarquização do Microgrid avaliado.

Inicialmente, apresenta-se o processo de construção da matriz quantitativa de indicadores de hierarquização para a avaliação em foco, que seguiu a abordagem metodológica apresentada e discutida no capítulo anterior. Na sequência, apresentam-se os resultados da aplicação do método de processo analítico hierárquico (AHP) para definição dos pesos dos critérios de classificação dos indicadores propostos na etapa anterior e do uso da técnica TOPSIS para hierarquizar, por categoria de requisitos.

5.1

Construção da matriz de indicadores

A construção da matriz de avaliação quantitativa de indicadores teve como ponto de partida a caracterização das categorias de Eficiência Energética e inteligência da rede analisada, identificando-se as questões relevantes a serem

avaliadas em cada categoria. Os indicadores inicialmente propostos para cada categoria foram posteriormente selecionados e hierarquizados com suporte de métodos multicritério de apoio à decisão, como o AHP e a técnica TOPSIS (Criollo, 2016). Apresentam-se, a seguir, os resultados da construção da matriz de avaliação quantitativa de indicadores.

5.1.1

Avaliação do objetivo da avaliação e resultados esperados

O primeiro passo da metodologia adotada foi avaliar o objetivo e os resultados esperados com a implementação de uma rede eficiente e inteligente. A partir desse entendimento, identificaram-nas os aspectos que deveriam ser alvo de monitoramento e avaliação.

5.1.2

Definição dos tipos de indicadores

Definiram-se os tipos de indicadores que serão obrigatórios para atender diferentes interesses identificados, além de expressar os resultados esperados, os indicadores foram classificados em (CRIOLLO, 2016):

- **Indicadores-chave:** refletem o conceito mais importante de um ou mais requisitos que deverão ser objeto de monitoramento e avaliação;
- **Indicadores complementares:** complementam os indicadores-chave, proporcionando confiabilidade da mensuração e rastreabilidade da informação;
- **Indicadores específicos:** além de expressar necessidades próprias de determinados interessados específicos do tema em contexto, questões especificamente a hierarquização.

5.1.3

Definição dos critérios de seleção dos indicadores

O passo seguinte consistiu na definição dos critérios de seleção de indicadores, os critérios foram classificados em (CRIOLLO, 2016):

- **Critérios eliminatórios:** devem ser obrigatoriamente atendidos pelo indicador proposto (caso não atenda, o indicador deve ser descartado);
- **Critérios classificatórios:** permitem a hierarquização dos indicadores, com suporte da técnica TOPSIS.

Essa proposta inicial foi validada durante as reuniões e benchmarking com os especialistas da área de energia da empresa em questão. Dessa forma, os critérios eliminatórios foram definidos como os de qualidade da energia recebida pela distribuidora: DIC, FIC e DMIC e os classificatórios os indicadores de eficiência energética e inteligência da rede.

5.2

Aplicação do método AHP para definição dos pesos dos critérios classificatórios

O método AHP, descrito no Anexo 1, foi o método de escolha para a definição de pesos dos quatro critérios classificatórios, a saber; (i) mensurabilidade; (ii) disponibilidade, quando for necessário; (iii) objetividade; e (iv) simplicidade de construção e entendimento. Esse método já havia sido adotado em pesquisa anterior do Programa gerando resultados confiáveis (MELO, 2015). Tal escolha deveu-se aos seguintes fatores:

- Modelagem em hierarquias e as comparações pareadas facilitam o entendimento geral do problema;
- Aplicável a julgamentos subjetivos, que é o caso dos questionamentos a serem gerados para a definição dos pesos dos critérios classificatórios para escolha final dos indicadores de hierarquização;

- Processo que pode ser documentado e repetido, caso haja necessidade de uma eventual inclusão de novos indicadores.

Para a aplicação do método AHP, foram consultados quatro especialistas da área de energia: três engenheiros e um técnico em eletrotécnica. A Tabela mostra a matriz quadrada e recíproca, construída com os resultados das comparações pareadas dos critérios classificatórios, tendo em vista a escolha de indicadores.

Os valores da diagonal da matriz serão sempre 1, pois refletem a comparação de um critério com ele mesmo. A leitura deve ser realizada a partir do critério indicado na linha em relação ao indicado na coluna. Por fim, o recíproco de cada elemento da matriz recebe o valor inverso da avaliação.

Com a matriz já preenchida, utilizou-se o sistema computacional IPÊ, versão 1.0, para cálculo dos pesos dos critérios, visando a hierarquização dos indicadores de cada uma das categorias de requisitos legais da regulamentação em foco (CRIOLLO, 2016).

O sistema computacional IPÊ versão 1.0 é um sistema que possibilita o desenvolvimento e implementação de modelos de auxílio multicritério à decisão, fundamentados no Método de Análise Hierárquica (AHP) (Costa, 2004). Esse sistema foi desenvolvido pela Universidade Federal Fluminense (UFF), com o propósito de disseminar o uso do algoritmo do AHP proposto por Thomas L. Saaty (COSTA, 2004).

Na tabela 2 são apresentados os pesos obtidos para cada um dos critérios classificatórios, juntamente com a “Razão de Consistência” (RC) das avaliações realizadas. De acordo com a descrição do método AHP (Anexo 1), os valores para a “Razão de Consistência” (RC) devem ser sempre menores que 0,1.

Tabela 2: Pesos Obtidos para cada um dos critérios classificatórios.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A1	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
A2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A4	0,05	0,00	0,03	0,01	0,00	0,04	0,09

Tabela 3: Descrição dos indicadores.

Indicadores de Eficiência		
C1	Fator de Carga	Quantitativo
C2	Fator de Potência	Quantitativo
C3	Demanda	Quantitativo
Indicadores de Inteligência		
C4	Digitalização	Qualitativo
C5	Autonomia	Qualitativo
C6	Coordenação	Qualitativo
C7	Selfhealing	Qualitativo

5.3

Aplicação da técnica TOPSIS para hierarquização final dos indicadores selecionados por categoria de requisitos legais

Avaliou-se a existência de conflitos de escolha entre duas ou mais opções de indicadores, mediante uma análise quantitativa, com suporte da ferramenta TOPSIS, apresentada no capítulo anterior e descrita em detalhe no Anexo 2. Para fins desta dissertação, considera-se a técnica TOPSIS como híbrida, pois foram utilizados pesos definidos anteriormente pelo método AHP (CRIOLLO, 2016).

O preenchimento foi conduzido pelos quatro especialistas que participaram da etapa anterior tendo como suporte a técnica TOPSIS, descrita no capítulo 4. Realizou-se ainda uma segunda análise, de natureza qualitativa. Os especialistas escolheram dentre os indicadores de posição superior, aqueles que melhor expressavam os resultados esperados com a implementação do *Microgrid* inteligente.

Após a escolha dos indicadores, e separação deles segundo Villela et al. (2007):

- Eliminatórios – índices de qualidade da energia, devem ser obrigatoriamente atendidos, caso não atenda, toda a avaliação posterior será afetada.
- Classificatórios - para estabelecimento de um ranqueamento dos indicadores, a partir de uma análise quantitativa ponderada.

O Resultado da escolha dos indicadores e dos respectivos pesos associado

Após a definição dos pesos pelos especialistas, a tabela 4 mostra os pesos de cada critério, de acordo com o que o grupo de especialistas julgou mais importante para inteligência e eficiência e definido anteriormente através do método AHP.

Tabela 4: Hierarquização dos indicadores.

Etapa	Indicador	Natureza do indicador					
		Eliminatórios			Classificatórios		
		C1	C2	C3	Peso Critério	Peso Subcritério	Peso TOPSIS
Eficiência	FC	1	1	1	0,67	0,675	0,45225
	FP	1	1	1		0,259	0,17353
	Demanda	1	1	1		0,065	0,04355
Inteligência	Supervisão e Controle	1	1	1	0,33	0,045	0,01485
	Autonomia	1	1	1		0,103	0,03399
	Coordenação	1	1	1		0,267	0,08811
	<i>Self-healing</i>	1	1	1		0,584	0,19272

Definido o desempenho dos indicadores em relação aos critérios para a etapa em questão e realizada a normalização da matriz para cada critério, para cálculo das melhores alternativas segundo o TOPSIS. As soluções ideais positivas (PIS) e negativas (NIS) e as distâncias euclidianas para cada indicador foram calculadas e estão apresentadas na tabela 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5: Soluções ideais PIS e NIS para cada critério.

Wj	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	45,2%	17,4%	4,4%	1,5%	3,4%	8,8%	19,3%
Tipos de Variáveis							
	Elemento			Pj mais			
A mais	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Elemento			Pj menos			
A menos	0,67	0,93	0,22	0,33	1,00	0,33	0,33

Tabela 6: Distâncias euclidianas (positivas e negativas) dos indicadores.

dij mais = pj mais - pij							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
SE1	0,26	0,01	0,17	0,67	0,00	0,67	0,67
SE2	0,29	0,07	0,61	0,67	0,00	0,67	0,67
SE3	0,33	0,06	0,78	0,67	0,00	0,67	0,67
SE4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
dij menos = pj menos - pij							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
SE1	-0,07	-0,07	-0,61	0,00	0,00	0,00	0,00
SE2	-0,05	0,00	-0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
SE3	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SE4	-0,33	-0,07	-0,78	-0,67	0,00	-0,67	-0,67

A partir das distâncias euclidianas, foram calculadas as proximidades relativas de cada indicador em relação à PIS (ξ), apresentadas na tabela 7 a seguir.

Tabela 7: Resultados da hierarquização dos indicadores desta categoria, com o suporte da técnica TOPSIS.

wj * (dij mais) ^ 2							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A1	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04	0,09
A2	0,04	0,00	0,02	0,01	0,00	0,04	0,09
A3	0,05	0,00	0,03	0,01	0,00	0,04	0,09
A4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
wj * (dij menos) ^ 2							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A1	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
A2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A4	0,05	0,00	0,03	0,01	0,00	0,04	0,09

Os valores RC estão de acordo com o esperado, com valores menores a 0,1, indicando que as comparações entre critérios foram adequadas. O Somatório é apresentado na tabela 8.

Tabela 8: Resultados do somatório.

	somatório [$w_j * (d_{ij} \text{ mais}) ^ 2$]
Indicador 1	0,16
Indicador 2	0,19
Indicador 3	0,21
Indicador 4	0,00

	somatório [$w_j * (d_{ij} \text{ menos}) ^ 2$]
Indicador 1	0,02
Indicador 2	0,00
Indicador 3	0,00
Indicador 4	0,21

Na tabela 9 é apresentado o *ranking* calculado através da distância euclidiana mais divididos pelo somatório das distancias mais e menos.

Tabela 9: Cálculo dos ξ das Subestações.

	Ranking - Cálculo de E $d_i \text{ mais} / (d_i \text{ menos} + d_i \text{ mais})$
E1	0,258
E2	0,100
E3	0,007
E4	1,000

5.4

Resultado final da hierarquização dos indicadores

A tabela 10 sintetiza o resultado final da simulação feita com quatro especialistas da área de energia. Essa simulação teve por objetivo demonstrar a aplicabilidade e facilidade de uso da ferramenta de seleção e hierarquização de indicadores para a avaliação em foco. Os procedimentos adotados poderão ser replicados no âmbito de qualquer *Smart Grid* ou *Microgrid*, tanto para a avaliação quantitativa de indicadores, quanto para indicadores de outros sistemas já implementados.

Tabela 10: *Ranking* das subestações.**Ranking Final - TOPSIS**

- 1 SE4
- 2 SE1
- 3 SE2
- 4 SE3

A subestação 4 (SE4), que obteve a melhor posição no ranking final, é aquela que tem atende a todos os critérios de forma ampla. Além disso, a esta era considerada pelos engenheiros e especialistas a mais eficiente e inteligente.

5.5**Considerações finais sobre o capítulo**

Pelos resultados apresentados neste capítulo, pode-se demonstrar a aplicabilidade da ferramenta para definição de indicadores e respectivas métricas desenvolvida para a avaliação de eficiência energética e inteligência da rede em um *Microgrid*.

Com o suporte da abordagem metodológica foi possível desenvolver uma matriz inicial de avaliação quantitativa de indicadores, que, por sua vez, foi submetida a uma avaliação junto as especialistas da área. Todos os participantes do *benchmarking* consideraram o formato e os conteúdos da matriz adequado para aplicação posterior, sugerindo apenas a retirada das métricas.

Optou-se pela abordagem de categorização de requisitos para o desenho da referida matriz. Desse modo, foi possível identificar com objetividade os aspectos da avaliação de uma rede eficiente e inteligente que deveriam ser alvo de monitoramento e avaliação constante, refletindo-se diretamente na proposição posterior de indicadores e respectivas métricas.

Buscando contribuir para o refinamento e melhoria contínua da abordagem adotaram-se dois métodos multicritério de apoio à decisão, a saber: método AHP para definição dos pesos dos critérios classificatórios e a técnica TOPSIS para a hierarquização final dos indicadores selecionados. Assim, o resultado final da pesquisa consiste de uma lista de indicadores, hierarquizados pelo grau de atendimento aos critérios classificatórios.

6

Conclusão

A presente pesquisa contribuiu para o avanço do conhecimento sobre ferramentas de avaliação de eficiência energética e inteligência da rede. Os resultados obtidos ao longo da pesquisa aqui relatada permitiram que o objetivo geral da dissertação fosse alcançado. Foi possível, com uso da matriz quantitativa de indicadores e de dois métodos multicritério de apoio à decisão, propor indicadores e respectivas métricas para a hierarquização das subestações da rede avaliada.

Pelos aspectos descritos e resultados gerados na fase aplicada da pesquisa, considera-se que eles propiciarão aos responsáveis pelo Microgrid, bem como aos diversos atores envolvidos na gestão de energia e custos da empresa, o ferramental adequado para hierarquização de seus resultados.

Com suporte de métodos multicritério de apoio à decisão, particularmente do método AHP e da técnica TOPSIS, foi possível desenvolver e demonstrar a ferramenta para avaliação quantitativa dos indicadores propostos inicialmente, por simulação que contou com a participação de quatro especialistas da área de energia.

Finalmente, como resultado da simulação da avaliação quantitativa e qualitativa dos indicadores candidatos, chegou-se a um conjunto de 7 indicadores hierarquizados pelo método TOPSIS.

Para trabalhos futuros de desdobramento da pesquisa e aprofundamento dos resultados, propõem-se:

- A medida que o Microgrid se torne mais eficiente, visitar os indicadores e avaliar a consistência dos mesmos;
- Ao passo que a rede se torna mais inteligente é possível medir e avaliar outros critérios, dessa forma sendo possível a inclusão de outros indicadores;
- Aplicar as ferramentas de modelo lógico e de seleção e hierarquização de indicadores no contexto de um *Smart Grid*.

Finalmente, acredita-se que a ferramenta de seleção e hierarquização de indicadores, com suporte dos métodos AHP e TOPSIS, bem como os indicadores e métricas resultantes de sua aplicação, poderão beneficiar as partes interessadas no processo de avaliação da inteligência de uma rede.

Referências bibliográficas

AMARAL, H.L.M. do. **Desenvolvimento de um smart meter**: um estudo sobre a eficiência energética através das redes inteligentes. 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2014.

AMIN, S.M.; WOLLENBERG, B.F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. **IEEE power and energy magazine**, v. 3, n. 5, p. 34-41, 2005.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA -. **Eficiência energética**: fundamentos e aplicações. Campinas, 2012.

ANTUNES, J.F. **Previsão de carga multinodal usando a rede neural ART-ARTMAP fuzzy**. 2013. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2013.

ARAÚJO, A.N.B. de. *et al.* Gestão da informação e o sistema Smart grid: um estudo de caso da UFRN. In: Colóquio Internacional Sobre Gestão Universitária na América do Sul, XI, 2011, Florianópolis, **Anais...**, Florianópolis, IGLU, 2011.

ASIA PACIFIC ENERGY RESEARCH CENTRE – APERC. **Energy Efficiency Indicators**: A Study of Energy Efficiency Indicators in APEC Economies. Tóquio (Japão): APERC, 2001.

ASSOCIAÇÃO INDUSTRIAL DO DISTRITO DE AVEIRO – AIDA. **Sistema de gestão energética**: guia prático. 2014.

BARROS, L.C.; SOUZA, A.L.; AMENDOLA, M. **Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5**. Campinas: Unicamp; Feagri & Imecc, 2005.

BILOBROVEC, M.; MARÇAL, R.F.M.; KOVALESKI, J.L. Implantação de um sistema de controle inteligente utilizando a lógica fuzzy. In: Simpósio de Engenharia de Produção, XI, 2004, Bauru, **Anais...**, Bauru, SIMPEP, 2004.

BORGES, F.Q. Indicadores de sustentabilidade para a energia elétrica no estado do Pará. **Revista Brasileira de Energia**, v. 15, n. 2, p. 119-151, 2009.

CAETANO, M.A.L. Lógica fuzzy para tomada de decisão em negócios e finanças. **Revista de Economia e Administração**, v. 5, n. 1, p. 12-39, 2006.

CALILI, R.F. **Políticas de eficiência energética no Brasil: uma abordagem em um ambiente econômico sob incerteza**. Rio de Janeiro. 2013. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

CAMBOIM, W.L.L.; SILVA, S.A. da; GOMES, H.P. Aplicação de técnicas *Fuzzy* no controle de pressão em sistemas de abastecimento de água. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 67-77. 2014.

CANEPPELE, F. de L. **Desenvolvimento de um modelo fuzzy para otimização da energia gerada por um sistema híbrido (solar-fotovoltaico e eólico)**. 2007. 103f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu, 2011.

CANEPPELE, F. de L. **Sistema fuzzy de suporte a decisão para aplicação de programa de eficiência energética em serrarias**. 2011. 160 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu, 2011.

CARÇÃO, J.F. de C. **Tarifas de energia elétrica no Brasil**. São Paulo. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL. **Guia para efficientização energética nas edificações públicas Versão 1.0**. Rio de Janeiro: MME, 2014.

CIMA, F.M. **Utilização de Indicadores Energéticos no Planejamento Energético Integrado**. Rio de Janeiro, 2006. 195 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO – CEPEL. **O que é eficiência energética**. 2016. Disponível em: <<http://www.celpe.com.br/Pages/Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica/o-que-e-ef-energetica.aspx>>. Acesso em: 16 jun. 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. **Manual de eficiência energética na indústria**. 2005.

COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ – COELCE. **Padrão de subestação: subestação de distribuição aérea e semiabrigada**. Diretoria técnica, 2005.

COSTA, H.G. **Auxílio multicritério à decisão: método AHP**. Rio de Janeiro: Abepro, 2006. ISBN 85-88478-30-7.

COSTA, H.G. IPÊ 1.0: Guia do Usuário. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2004. Disponível em: <http://www.producao.uff.br/conteudo/rpep/volume42004/RelPesq_V4_2004_05.pdf>.

CRIOLLO, L.F.R. **Monitoramento e avaliação da regulamentação sobre rotulagem de alimentos alergênicos no Brasil: proposição de indicadores e**

métricas Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2016

CRUZ, I. **Desenvolvimento de um índice global para a avaliação do desempenho ambiental de sistemas de transporte de carga.** 2011. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

DUALIBE, P. **Subestações:** tipos, equipamentos e proteção. Consultoria para uso eficiente de energia. Centro Federal de Educação tecnológica Celso Suckow da Fonseca, nov., 1999.

DUTRA, C.C.; FOGLIATTO, F.S. **Operacionalização do processo analítico hierárquico usando matrizes incompletas de comparações pareadas.** Anais do XXXIX simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, p. Fortaleza, 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019).** Nota técnica DEA 14/10. Série Estudos da Demanda. Rio de Janeiro: MME, 2010.

Avaliação da eficiência energética para os próximos 10 anos (2012-2021). Nota técnica DEA 16/12. Série Estudos de Demanda. Rio de Janeiro: MME, 2012.

ELETROBRÁS. **Energia elétrica:** conceito, qualidade e tarifação: guia básico. Brasília: IEL/NC, 2008.

ENDO, W. *et al.* Metodologia e práticas de aprendizagem para sistemas de gerenciamento de energia: aplicações em laboratórios didáticos de graduação em engenharia. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, XXXIX, 2011, Blumenau, **Anais...**, Blumenau, COBENGE, 2011.

FALCÃO, D.M. Redes elétricas inteligentes Smart grid. **Seminário:** Inserção de novas fontes renováveis e redes inteligentes no planejamento energético nacional. Setembro, COPPE: UFRJ, 2012.

FUGIMOTO, S.K. **Estrutura de tarifas de energia elétrica: análise crítica e proposições metodológicas.** São Paulo. 2010. 195 f. Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

FURTADO, A.T. Energia e desenvolvimento: a necessária transição para um novo modelo de desenvolvimento. In: SOUZA, P. de. **Brasil, sociedade em movimento.** Rio de Janeiro: Centro Internacional Celso Furtado, 2015.

GAMA NETO, A. de S. *et al.* Análise de um projeto de eficiência energética em um posto de combustíveis com base metodológica no Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP). **Persp. online:** exatas & engenharia, v. 2, n. 1, p. 54-73, 2011.

GANGA, G.M.D.; CARPINETTI, L.C.R. POLITANO, P.R. Gestão do desempenho em cadeias de suprimento usando lógica fuzzy. **Gest. Prod.**, v. 18, n. 4, p. 755-774, 2011.

GONÇALVES, R. W.; PINHEIRO, P. R.; FREITAS, M. A. D. S. **Métodos multicritérios como auxílio à tomada de decisão na bacia hidrográfica do Rio Curu - estado do Ceará.** 2009.

GUERREIRO, A.G. *et al.* A eficiência como recurso de planejamento energético no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 15, n. 1, p. 119-130, 2009.

IRREK, W. *et al.* **Defining energy efficiency.** Work paper. Wuppertal Institut. 2008.

ISO 50001 – SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA. 2016. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/iso-50001-gestao-de-energia/>>. Acesso em: 08 jun. 2016.

LEYVA-VAZQUEZ, M.Y.; BELLO-LARA, R.; ESPIN-ANDRADE, R.A. Compensatory fuzzy logic for intelligent social network analysis. **Rev. Cuba Cienc. Informat.**, v. 8, n. 4, p. 74-85, 2014.

MARRO, A.A. *et al.* **Lógica fuzzy: conceitos e aplicações.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 2010.

MATHWORKS. **Fuzzy Logic Toolbox™:** user's guide. Mathworks, 2007.

MATOS, J.G. de. **Controle de potência em microrredes CA isoladas com aerogeradores e bancos de baterias distribuídos.** 2014. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, São Luís, 2014.

McDONALD, J. D. **Electric power substations engineering.** 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

MELO, A. **Monitoramento e avaliação da regulamentação sobre recolhimento de alimentos no Brasil: proposição de indicadores e métricas**” Dissertação de mestrado (Mestrado em Metrologia) PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2015.

MENKES, M. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade.** Brasília. 2004. 295 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

MUZZY, G.L.C. de O. Subestações elétricas. 2012. 122 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

NOGUEIRA, L.A.H. Uso racional: a fonte energética oculta. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 91-105. 2007.

OLIVEIRA, R.D.; VIEIRA JÚNIOR, J.C. de M. Benefícios e desafios de redes inteligentes. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 2, n. 1, 2012.

PATTERSON, M.G. What is energy efficiency? **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.

PIAGI, P.; LASSETER, R.H. Autonomous control of microgrids. **Power Engineering Society General Meeting**, jun. 2006.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL. **Manual de tarifação da energia elétrica**. 2001.

PEREIRA, R.D.A. **Aplicação do método AHP na redução de multas em empresas de telecomunicações**. 2010. 104 p. Centro de Ciências Exactas, Ambientales e de Tecnologias, Pontificia Universidade Católica de Campinas, Campinas.

SAATY, T.L. Decision making by the analytic hierarchy process: Theory and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 98-104, 1990/09/05 1990. ISSN 0377-2217. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179090066K> >.

SAATY, T.L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: Mc - Graw Hill, 1991.

SAATY, T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234-281, 6// 1977. ISSN 0022-2496. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022249677900335> >.

SAATY, T.L. **Decision making for leaders**. University of Pittsburgh, 2000. ISBN 0-9620317-8-X. Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?hl=es&lr=&id=c8KqSWPFwIUC&oi=fnd&pg=PT8&dq=decision+making+for+leaders+2000&ots=2KQPHmHKTm&sig=viX499yTdv0y59tHJ-gqi91bnF43U#v=onepage&q=decision%20making%20for%20leaders%202000&f=false> >. Acesso em: 30.mai. 2016.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, methods, concepts & applications of the analytic hieratchy process**. Second Edition. New York: International Series in Operations Research & Management Science, 2012. ISBN 978-1-4614-3596-9.

Manual de tarifação da energia elétrica. 2011.

REIS, T.M.P.S.C. **Otimização de processos e ferramentas de controlo e gestão em sistemas de proteção, comando e controlo**. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Automação) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

Resolução normativa n. 414, de 9 de setembro de 2010. **Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>>. Acesso em: 27 set. 2016.

RIVERA, R.; ESPOSITO, A.S.; TEIXEIRA, I. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. **Revista BNDES**, v. 40, dezembro, p. 43-84, 2013.

SAIDEL, M.A.; FAVATO, L.B.; MORALES, C. Indicadores energéticos e ambientais: ferramenta importante na gestão da energia elétrica. In: Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, I, 2005. Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte, CBEE, 2005.

SAMPAIO JÚNIOR, A.R. **Controle de microgrids dirigido por modelos.** Goiânia. 2014, 105f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) Programa de Pós-graduação em Ciências da Computação, Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SENA, F. das C.B. de. **Controle fuzzy aplicado à otimização de um sistema eólico de velocidade variável.** 2015. 76f. (Dissertação em Sistemas de Comunicação e Automação) Programa de pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2015.

SILVA, M.A.B. **Sistema de classificação fuzzy para áreas contaminadas.** 2005. 221 f. Tese (Doutorado Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, V.P. da. **Análise da eficiência energética em uma indústria têxtil: um estudo de caso relacionado a perdas e produtividade.** João Pessoa. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

SILVA, V.P. da. *et al.* A convergência entre eficiência energética e a produção mais limpa em uma indústria têxtil da Paraíba. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXII, 2012. Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABEPRO, ENEGEP, p. 1-10, 2012.

SIMÕES, M.G.; SHAW, I.S. **Controle e modelagem Fuzzy.** 2 ed. São Paulo: Blucher, 2007.

SOARES, F.T. *et al.* Fuzzy control applied to an electrical power generation system mounted on tractors for driving of agricultural implements. **Eng. Agríc.**, v. 36, n. 5, p. 846-857, 2016.

SOLA, A.V.H. **Fatores Humanos como Barreiras para Eficiência Energética em Indústrias**. Ponta Grossa. 2006. 118f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2006.

SOLER, E.M. et al. Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água. **Production**, v. 26, n. 2, p. 385-401, abr./jun. 2016.

SOTO, J.C. *et al.* Diseño y aplicación de un procedimiento para la planificación energética según la NC-ISO 50001:2011. **Ingeniería Energética**, v. XXXV, n. 1, p. 38-47, Enero/Abril, 2014.

SOUZA, O.T L. **Desenvolvimento de um modelo fuzzy para determinação do calor latente com aplicação em sistemas de irrigação**. 2004. 113f. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

SUP, L.M.A. **Arquitetura física e lógica de uma smart microgrid para a gestão integrada da energia: um modelo para o Parque Tecnológico de Itaipu**. Foz do Iguaçu. 2012. 109f. Dissertação (Mestrado) Programa de pós-graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2012.

TAVARES, F.V.; MONTEIRO, L. Indicadores de eficiência energética na indústria de fertilizantes de amônia. **Sistemas & Gestão**, v. 9, n. 2, p. 216-223, 2014.

VILLELA, T.M.D.A. *et al.* **Metodologia para desenvolvimento e seleção de indicadores para planejamento de transportes**. CEFTRU, 2007. Disponível em: < 100

https://www.researchgate.net/publication/267962892_metodologia_para_desenvolvimento_e_selecao_de_indicadores_para_planejamento_de_transportes >. Acesso em: 25.mar.2016.

Anexo 1 – Descrição do método analítico hierárquico – AHP

Este anexo é parte integrante da dissertação de Ariani Mello intitulada “Monitoramento e avaliação da regulamentação sobre recolhimento de alimentos no Brasil: proposição de indicadores e métricas” (Mello, 2015). Descreve-se a seguir o método AHP conforme o proposto por Saaty (1977, 1991, 2008).

O método AHP compreende quatro etapas, de acordo com a descrição de Saaty (1991) e Costa (2006):

- Organização da estrutura hierárquica, através da identificação do foco principal, dos critérios e subcritérios (quando existirem) e das alternativas, refletindo as relações existentes entre eles;
- Aquisição dos dados e coleta de julgamentos de valor, através da comparação dos elementos dois a dois e estabelecimento das matrizes de comparações;
- Análise das matrizes de comparações geradas na fase anterior, que indicarão a prioridade de cada alternativa em relação ao foco principal;
- Análise dos indicadores de desempenho derivados, como índices de consistência por exemplo.

No AHP, os elementos de uma hierarquia para a resolução de problemas de decisão são o foco principal (ou meta), o conjunto de alternativas viáveis e o conjunto de critérios, de acordo com o ilustrado na Figura 1.

O foco principal é o objetivo global, o que a resolução do problema trará. As alternativas viáveis são as possibilidades de escolha dentro do problema para que a decisão seja tomada. Por fim, os critérios são as características ou propriedades a partir das quais as alternativas devem ser avaliadas.

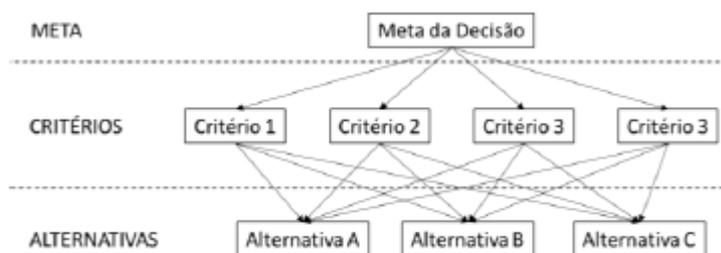


Figura 1: Exemplo de estrutura hierárquica de problemas de decisão (em três níveis).
Fonte: Saaty, 103, 1991.

Após a hierarquização, o método aponta para os julgamentos de valor, onde o avaliador deve comparar os elementos dois a dois à luz de um determinado critério. O julgamento é então a representação numérica dessa relação e o grupo de todos os julgamentos, considerando a comparação de todos os elementos em relação a um critério específico, pode ser representado através de uma matriz quadrada (Saaty, 1991).

Para o estabelecimento do processo de julgamento, Saaty (1990) definiu uma escala específica para padronizar os julgamentos de valor, escala essa que capta a subjetividade natural existente em variáveis qualitativas. O Quadro 1, a seguir, apresenta essa escala.

Quadro 1 – Escala para padronizar os julgamentos de valor pelo método AHP

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes.	Quando se procura uma condição de compromisso entre as duas definições.

Fonte: Saaty, 1991.

O julgamento consiste no reflexo de duas perguntas: qual dos dois elementos é o mais importante, à luz do objetivo pretendido, e com qual intensidade ele é mais importante, utilizando-se a escala de 1 a 9 apresentada no Quadro 1.

Para o elemento mais importante, é utilizado um valor inteiro, enquanto que o menos importante recebe o inverso dessa unidade, como ilustrado no exemplo didático da Figura 2.

Matriz A

	A	B	C	D
A	1	5	6	7
B	1/5	1	4	6
C	1/6	1/4	1	4
D	1/7	1/6	1/4	1

Figura 2 - Exemplo de matriz de julgamentos para o método AHP

Fonte: Saaty, 1991.

As letras A, B, C e D representam os elementos a serem comparados dois a dois. A diagonal da matriz recebe sempre 1 pois é a comparação do elemento com ele mesmo. Para o preenchimento dos outros campos, são feitos os julgamentos para determinar a intensidade de importância, utilizando a escala determinada por Saaty. Para as comparações inversas, ou seja, o que está na parte inferior esquerda da matriz, são adicionados os valores recíprocos referentes à cada julgamento, que estão na parte superior direita da mesma.

Com as matrizes recíprocas devidamente estruturadas, obtém-se o vetor de prioridades, ou pesos, a partir do cálculo do autovetor normalizado do máximo autovalor. Existem métodos específicos para o cálculo aproximado desses valores (Saaty, 1991). Tais aproximações foram desenvolvidas por limitações computacionais da época em que o método foi desenvolvido, sendo custoso o cálculo de autovetores e autovalores para matrizes de ordem elevada.

Para fins deste trabalho, será utilizado o valor preciso de ambas as grandezas, que são denotadas matricialmente por:

$$Aw = \lambda_{max} w \quad (1)$$

Onde:

A é a matriz de julgamentos (quadrada, recíproca e positiva);

w é o autovetor principal, referente aos pesos;

λ_{max} é o autovalor principal de A .

Com as características das matrizes de julgamentos em mãos, através do teorema de Perron-Frobenius, Saaty (1991) afirma que a solução tem um único maior autovalor que corresponde a um autovetor de componentes estritamente positivos. Os teoremas e as provas acerca das características envolvendo as matrizes geradas, a partir da avaliação de especialistas, são apresentados em seu trabalho. Computados os autovalores das respectivas matrizes, é necessário realizar análise da consistência dos julgamentos para avaliar o quão afastado da consistência os julgamentos estão. Utiliza-se uma medida para avaliar a probabilidade dos julgamentos terem sido realizados puramente ao acaso e esta medida é chamada Razão de Consistência (RC). Por exemplo, um $RC=0,3$ diz que há 30% de chance do especialista responder as perguntas aleatoriamente.

Saaty (1991) apresenta um desenvolvimento simples e intuitivo para compreender a análise de consistência. Vamos supor uma matriz consistente, onde as comparações são baseadas em medidas exatas, isto é, os pesos já são conhecidos, então:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (2)$$

Como o julgamento é perfeito para todas as comparações, tem-se que $a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk}$ para qualquer i, j, k , variando de 1 até n , sendo n a ordem da matriz.

Também vale a afirmativa:

$$a_{ij} = \frac{w_j}{w_i} = \frac{1}{w_i/w_j} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (3)$$

Dessa forma caracteriza-se uma matriz consistente de comparações paritárias.

Considerando $x=(x_1, \dots, x_n)$ e $y=(y_1, \dots, y_n)$ pode-se escrever em notação matricial $A \cdot x = y$, onde A é a matriz de julgamentos:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \\ \frac{w_n}{w_1} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Algebricamente essa operação pode ser representada por:

$$\sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot x_j = y_i$$

para $i = 1, \dots, n$ (5)

Como $a_{ij} = w_i/w_j$, obtém-se:

$$a_{ij} \frac{w_j}{w_i} = 1$$

para $i, j = 1, \dots, n$ (6)

Consequentemente:

$$\sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot w_j \frac{1}{w_i} = n$$

para $i = 1, \dots, n$ (7)

Ou

$$\sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot w_j = n w_i$$

para $i = 1, \dots, n$ (8)

Que é equivalente a equação matricial:

$$Aw = nw \quad (9)$$

Em álgebra linear, esta última equação expressa o fato de que w é autovetor de A com autovalor n .

Na prática a_{ij} são os pesos atribuídos pelo julgamento dos especialistas, baseado na escala fundamental, e de certa forma subjetivos. Assim os valores a_{ij} irão se afastar do “ideal” $w_i w_j$, fazendo com que a equação $Aw=nw$ não seja mais válida.

Se $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ são os números que satisfazem a equação $Aw=\lambda w$, então λ é autovalor de A e, se $a_{ij}=1$ para todo i , então:

$$\sum_{i=0}^n \lambda_i = n \quad (10)$$

Assim, se $Aw=nw$ é válida, somente um dos autovalores é diferente de zero e valerá n , sendo o maior autovalor de A .

Caso os elementos de uma matriz recíproca positiva sofrerem pequenas variações, seus respectivos autovalores também variarão em pequenas quantidades.

Utilizando os resultados apresentados juntamente com o axioma acima, pode-se dizer que caso a diagonal principal de uma matriz possuir os elementos iguais a 1 e for consistente, pequenas variações nos elementos a_{ij} farão com que o autovalor máximo λ_{max} permaneça próximo de n e os outros autovalores próximos de zero. Sendo $\lambda_{max} \geq n$.

Portanto, para calcular o autovetor de prioridades de uma matriz de comparações paritárias A , deve-se encontrar o vetor que satisfaça a equação $Aw=\lambda_{max}w$.

O valor de interesse para o desenvolvimento da metodologia é o autovetor normalizado, de forma que a soma de w seja igual a 1. Para isso cada elemento w_i é dividido pelo seu somatório.

Uma medida de consistência, chamada Índice de Consistência (IC), é utilizada para calcular o desvio de λ_{max} em relação à n , uma vez que a utilização da escala para os julgamentos geram variações em a_{ij} , alterando λ_{max} .

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

É comum as avaliações realizadas pelos especialistas gerarem inconsistências, pois faz parte do julgamento humano, mas deseja-se que sejam as menores possíveis. Para verificar a coerência utiliza-se, como citado anteriormente, a Razão de Consistência tendo como definição:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (12)$$

IR (Índice Randômico) é o índice de consistência de uma matriz recíproca gerada randomicamente, baseada na escala de 1 a 9, com recíprocas forçadas (Saaty, 1991). Este valor é tabelado e varia de acordo com a ordem da matriz. Na tabela 1 é apresentado o valor de IR para matrizes de ordem 1 até 10.

Tabela 1 - Índice randômico

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty e Vargas, 2012.

A avaliação final da coerência do julgamento se dá ao comparar o valor de RC. Para o presente desenvolvimento faz-se as seguintes considerações:

a) $RC \leq 0,1$ consiste em um julgamento coerente, premissa básica do método em relação a análise de coerência, proposta inicialmente para julgar uma avaliação como satisfatória;

b) $0,1 < RC < 0,2$ = Julgamento questionável, considerado para que especialista reveja seus julgamentos da respectiva etapa, analisando a matriz construída e busque melhorar alguma(s) comparação(ões) que tenha(m) sido inconsistente(s). Porém não é obrigatório que se altere algum julgamento;

c) $RC \geq 0,2$ = Julgamento incoerente, indica que as comparações pareadas daquela etapa geraram um alto índice de inconsistência e o especialista é obrigado a refazer seus julgamentos.

Uma vez alcançada a consistência no julgamento, são calculados os vetores de prioridades, ou seja, os pesos relativos de cada elemento do problema. Este cálculo é realizado através da multiplicação das matrizes de prioridades. Em outras palavras, para cada alternativa, o cálculo consiste na soma ponderada da importância relativa de cada atributo pelo nível de preferência de determinada alternativa em relação ao respectivo critério (Souza, 2013). No AHP cada alternativa receberá uma pontuação através de uma função de valor aditiva. As alternativas com maior valor serão as preferíveis (Passos, 2010). Formalizando, a função de valor para cada alternativa será:

Onde:

$F(a)$ é o valor final de alternativa a ;

w_j é o peso do j -ésimo critério;

u_j é o desempenho da alternativa em relação ao j -ésimo critério.

Referências

- SAATY, T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v.1, n.1, p. 83-98, 2008.
- SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: Mc - Graw Hill, 1991.
- SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process**. 2nd. ed. New York: International Series in Operations Research & Management Science, 2012.

Anexo 2 – Descrição da técnica para avaliar o desempenho de alternativas pela similaridade com a solução ideal – TOPSIS

Este anexo é parte integrante da dissertação de Ariani Mello intitulada “Monitoramento e avaliação da regulamentação sobre recolhimento de alimentos no Brasil: Proposição de indicadores e métricas” (Mello, 2015).

Descreve-se a seguir o método TOPSIS conforme o descrito por Hwang e Yoon, (1981)

Basicamente, a técnica compreende as seguintes etapas:

- Construção da matriz do problema ou matriz de decisão, que traz as alternativas e critérios selecionados juntamente com as notas e avaliações;
- Cálculo da matriz normalizada, utilizando normalização linear ou por vetor;
- Cálculo da matriz com os respectivos pesos de cada critério, definidos previamente por um ou mais decisores;
- Identificação da PIS e da NIS;
- Cálculo das distâncias entre a PIS e cada alternativa e entre a NIS e cada alternativa;
- Cálculo da similaridade para a posição ideal positiva, que vai definir a hierarquização das alternativas estudadas.

A matriz de decisão A composta por alternativas e critérios é apresentada abaixo:

$$A = \begin{matrix} & C_1 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (14)$$

Onde A_1, A_2, \dots, A_m são alternativas viáveis e C_1, C_2, \dots, C_n são critérios; x_{ij} indica o desempenho da alternativa A_i segundo o critério C_j .

O vetor de peso $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ composto pelos pesos individuais para cada critério C_j satisfaz

$$\sum_{i=1}^n w_j = 1. \quad (15)$$

Os dados da matriz A têm origens distintas, devendo ser normalizada com o objetivo de transformá-la em uma matriz adimensional e com isso proceder a uma comparação entre os vários critérios. Para fins de aplicação nesta pesquisa, a matriz A deve ser normalizada para cada critério C_j , de acordo com a seguinte fórmula:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \text{ com } i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (16)$$

Assim, uma matriz de decisão normalizada A_n representa o desempenho relativo das alternativas e pode ser descrita por:

$$A_n = (p_{ij})_{m \times n}, \text{ com } i = 1, \dots, m, \text{ e } j = 1, \dots, n. \quad (17)$$

O algoritmo para calcular a melhor alternativa segundo a técnica TOPSIS compreende os seguintes passos (Krohling e Souza, 2011):

Passo 1: Cálculo das soluções ideais positivas A^+ (benefícios) e das soluções ideais negativas A^- (custos) da seguinte forma:

$$A^+ = (p_1^+, p_2^+, \dots, p_m^+) \quad (18)$$

$$A^- = (p_1^-, p_2^-, \dots, p_m^-) \quad (19)$$

Onde:

$$p_j^+ = (\max_i p_{ij}, j \in J_1; \min_i p_{ij}, j \in J_2) \quad (20)$$

$$p_j^- = (\min_i p_{ij}, j \in J_1; \max_i p_{ij}, j \in J_2) \quad (21)$$

Onde j_1 e j_2 representam respectivamente o critério *benefício* e *custo*.

Passo 2: Cálculo das distâncias Euclidianas entre A_i e A_+ (benefícios) e entre A_i e A_+ (custos) da seguinte forma:

$$d^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (p_j^+ - p_{ij})^2} \quad \text{com } i = 1, \dots, m. \quad (22)$$

$$d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (p_j^- - p_{ij})^2} \quad \text{com } i = 1, \dots, m. \quad (23)$$

Passo 3: Cálculo da proximidade relativa ξ_i para cada alternativa A_i em relação à solução ideal positiva A_+ conforme:

$$\xi_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}. \quad (24)$$

Referências

HWANG, C.-L.; YOON, K. Multiple Attribute Decision Making. Methods and applications New York: 1981.

KROHLING, R. A.; SOUZA, D. T. T. M. Dois exemplos da aplicação da técnica TOPSIS para tomada de decisão. **Revista Sistemas de Informação da FSMA**, v. 8, p. 31-35, 2011.

Apêndice 1 – Coleta de Dados em campo

O analisador de redes de energia Power net P600 foi conectado na entrada do fornecimento de energia das subestações conforme mostra a figura 1. Além disso, foram coletados dados do consumo total de energia elétrica, demanda e fator de carga utilizados como dados para essa pesquisa e são listados nas tabelas de 1 a 4 a seguir.



Figura 1: Analisador Portátil Power Net P600 ligado em rede trifásica junto a entrada de energia nas subestações.

Subestação 1:

Tabela 1: Dados coletados da Subestação 1.

Registro	Data	Hora	Pt(W)	FPt
1	30/06/2016	17:15:00:00	79.084,67	0,95
2	30/06/2016	17:30:00:00	78.609,33	0,96
3	30/06/2016	17:45:00:00	81.400,67	0,96
4	30/06/2016	18:00:00:00	76.119,00	0,95
5	30/06/2016	18:15:00:00	77.469,67	0,95
6	30/06/2016	18:30:00:00	77.167,33	0,95
7	30/06/2016	18:45:00:00	76.206,67	0,95
8	30/06/2016	19:00:00:00	75.083,67	0,95
9	30/06/2016	19:15:00:00	74.766,67	0,94
10	30/06/2016	19:30:00:00	71.698,33	0,94
11	30/06/2016	19:45:00:00	70.897,33	0,94
12	30/06/2016	20:00:00:00	70.245,67	0,94
13	30/06/2016	20:15:00:00	67.718,00	0,93
14	30/06/2016	20:30:00:00	66.792,67	0,93
15	30/06/2016	20:45:00:00	63.285,00	0,93
16	30/06/2016	21:00:00:00	61.586,00	0,92
17	30/06/2016	21:15:00:00	57.775,33	0,92
18	30/06/2016	21:30:00:00	54.840,00	0,91
19	30/06/2016	21:45:00:00	55.579,00	0,91
20	30/06/2016	22:00:00:00	53.898,33	0,91
21	30/06/2016	22:15:00:00	47.052,67	0,94
22	30/06/2016	22:30:00:00	45.581,67	0,95
23	30/06/2016	22:45:00:00	45.381,33	0,95
24	30/06/2016	23:00:00:00	43.498,00	0,95
25	30/06/2016	23:15:00:00	36.455,00	0,94
26	30/06/2016	23:30:00:00	35.963,00	0,94
27	30/06/2016	23:45:00:00	35.464,67	0,94
28	01/07/2016	00:00:00:00	35.664,00	0,94
29	01/07/2016	00:15:00:00	33.389,33	0,93
30	01/07/2016	00:30:00:00	32.430,67	0,93
31	01/07/2016	00:45:00:00	31.571,00	0,93
32	01/07/2016	01:00:00:00	31.192,33	0,93
33	01/07/2016	01:15:00:00	30.462,67	0,93
34	01/07/2016	01:30:00:00	30.744,67	0,93
35	01/07/2016	01:45:00:00	29.585,00	0,93

36	01/07/2016	02:00:00:00	29.799,33	0,93
37	01/07/2016	02:15:00:00	29.315,33	0,93
38	01/07/2016	02:30:00:00	29.243,67	0,93
39	01/07/2016	02:45:00:00	29.341,33	0,93
40	01/07/2016	03:00:00:00	29.541,67	0,93
41	01/07/2016	03:15:00:00	29.598,33	0,93
42	01/07/2016	03:30:00:00	29.924,33	0,93
43	01/07/2016	03:45:00:00	29.722,33	0,93
44	01/07/2016	04:00:00:00	29.629,33	0,93
45	01/07/2016	04:15:00:00	29.816,33	0,92
46	01/07/2016	04:30:00:00	30.282,00	0,93
47	01/07/2016	04:45:00:00	30.081,00	0,92
48	01/07/2016	05:00:00:00	30.224,00	0,92
49	01/07/2016	05:15:00:00	30.495,67	0,92
50	01/07/2016	05:30:00:00	30.393,00	0,92
51	01/07/2016	05:45:00:00	30.407,33	0,92
52	01/07/2016	06:00:00:00	30.674,00	0,92
53	01/07/2016	06:15:00:00	39.232,67	0,95
54	01/07/2016	06:30:00:00	39.158,67	0,95
55	01/07/2016	06:45:00:00	40.607,00	0,95
56	01/07/2016	07:00:00:00	42.850,33	0,95
57	01/07/2016	07:15:00:00	51.774,00	0,94
58	01/07/2016	07:30:00:00	50.560,67	0,93
59	01/07/2016	07:45:00:00	54.194,67	0,94
60	01/07/2016	08:00:00:00	53.535,33	0,93
61	01/07/2016	08:15:00:00	55.188,00	0,93
62	01/07/2016	08:30:00:00	55.240,00	0,94
63	01/07/2016	08:45:00:00	55.705,67	0,94
64	01/07/2016	09:00:00:00	58.007,00	0,94
65	01/07/2016	09:15:00:00	60.260,00	0,95
66	01/07/2016	09:30:00:00	58.068,33	0,94
67	01/07/2016	09:45:00:00	64.472,67	0,95
68	01/07/2016	10:00:00:00	63.547,33	0,95
69	01/07/2016	10:15:00:00	63.334,00	0,95
70	01/07/2016	10:30:00:00	66.234,00	0,95
71	01/07/2016	10:45:00:00	66.090,67	0,95
72	01/07/2016	11:00:00:00	67.017,00	0,95
73	01/07/2016	11:15:00:00	67.478,67	0,95
74	01/07/2016	11:30:00:00	70.130,00	0,95
75	01/07/2016	11:45:00:00	70.235,67	0,95

76	01/07/2016	12:00:00:00	71.233,00	0,95
77	01/07/2016	12:15:00:00	72.644,00	0,95
78	01/07/2016	12:30:00:00	75.368,67	0,95
79	01/07/2016	12:45:00:00	78.812,33	0,96
80	01/07/2016	13:00:00:00	76.841,00	0,96
81	01/07/2016	13:15:00:00	77.404,33	0,95
82	01/07/2016	13:30:00:00	78.120,00	0,96
83	01/07/2016	13:45:00:00	77.608,00	0,96
84	01/07/2016	14:00:00:00	78.919,67	0,96
85	01/07/2016	14:15:00:00	77.397,67	0,96
86	01/07/2016	14:30:00:00	79.428,67	0,96
87	01/07/2016	14:45:00:00	78.418,67	0,96
88	01/07/2016	15:00:00:00	76.757,67	0,96
89	01/07/2016	15:15:00:00	79.805,33	0,96
90	01/07/2016	15:30:00:00	78.272,33	0,96
91	01/07/2016	15:45:00:00	74.248,33	0,95
92	01/07/2016	16:00:00:00	73.503,00	0,95
93	01/07/2016	16:15:00:00	76.928,00	0,95
94	01/07/2016	16:30:00:00	74.126,00	0,95
95	01/07/2016	16:45:00:00	76.374,00	0,95
96	01/07/2016	17:00:00:00	77.582,33	0,95
97	01/07/2016	17:15:00:00	77.235,00	0,95
98	01/07/2016	17:30:00:00	74.565,00	0,95
99	01/07/2016	17:45:00:00	74.476,00	0,95
100	01/07/2016	18:00:00:00	73.257,33	0,94
		Máximo	81.400,67	0,96
		Mínimo	29.243,67	0,91
		Média	56.653,97	0,94
		FC	0,70	demanda média/demanda máx

Subestação 2:

Tabela 2: Dados coletados da Subestação 2.

Registro	Data	Hora	Pt(W)	FPt
1	29/06/2016	12:15:00:00	31.179,67	0,90
2	29/06/2016	12:30:00:00	36.453,33	0,89
3	29/06/2016	12:45:00:00	35.583,00	0,89
4	29/06/2016	13:00:00:00	32.523,67	0,90
5	29/06/2016	13:15:00:00	35.893,33	0,89
6	29/06/2016	13:30:00:00	37.557,00	0,89
7	29/06/2016	13:45:00:00	35.534,33	0,89
8	29/06/2016	14:00:00:00	34.903,67	0,89
9	29/06/2016	14:15:00:00	35.738,67	0,89
10	29/06/2016	14:30:00:00	37.221,33	0,89
11	29/06/2016	14:45:00:00	34.245,00	0,89
12	29/06/2016	15:00:00:00	34.354,00	0,88
13	29/06/2016	15:15:00:00	34.126,00	0,88
14	29/06/2016	15:30:00:00	32.506,33	0,88
15	29/06/2016	15:45:00:00	35.157,67	0,88
16	29/06/2016	16:00:00:00	34.434,67	0,88
17	29/06/2016	16:15:00:00	35.139,67	0,90
18	29/06/2016	16:30:00:00	39.136,33	0,90
19	29/06/2016	16:45:00:00	36.784,67	0,90
20	29/06/2016	17:00:00:00	30.643,00	0,89
21	29/06/2016	17:15:00:00	31.354,67	0,88
22	29/06/2016	17:30:00:00	38.634,00	0,88
23	29/06/2016	17:45:00:00	36.236,33	0,90
24	29/06/2016	18:00:00:00	38.405,67	0,90
25	29/06/2016	18:15:00:00	35.844,33	0,89
26	29/06/2016	18:30:00:00	34.556,67	0,89
27	29/06/2016	18:45:00:00	33.225,33	0,89
28	29/06/2016	19:00:00:00	32.380,33	0,89
29	29/06/2016	19:15:00:00	34.551,00	0,89
30	29/06/2016	19:30:00:00	32.629,67	0,89
31	29/06/2016	19:45:00:00	28.439,67	0,89
32	29/06/2016	20:00:00:00	29.075,67	0,88
33	29/06/2016	20:15:00:00	26.975,33	0,89
34	29/06/2016	20:30:00:00	26.489,00	0,88
35	29/06/2016	20:45:00:00	27.159,33	0,88

36	29/06/2016	21:00:00:00	26.190,33	0,88
37	29/06/2016	21:15:00:00	25.735,33	0,88
38	29/06/2016	21:30:00:00	27.891,33	0,88
39	29/06/2016	21:45:00:00	27.404,00	0,89
40	29/06/2016	22:00:00:00	27.452,33	0,88
41	29/06/2016	22:15:00:00	27.125,33	0,89
42	29/06/2016	22:30:00:00	27.392,00	0,88
43	29/06/2016	22:45:00:00	27.428,33	0,88
44	29/06/2016	23:00:00:00	27.156,67	0,89
45	29/06/2016	23:15:00:00	26.445,33	0,88
46	29/06/2016	23:30:00:00	24.315,67	0,88
47	29/06/2016	23:45:00:00	25.254,33	0,88
48	30/06/2016	00:00:00:00	23.496,33	0,88
49	30/06/2016	00:15:00:00	24.827,67	0,88
50	30/06/2016	00:30:00:00	24.180,67	0,88
51	30/06/2016	00:45:00:00	24.639,67	0,87
52	30/06/2016	01:00:00:00	23.926,67	0,88
53	30/06/2016	01:15:00:00	24.484,67	0,87
54	30/06/2016	01:30:00:00	24.352,00	0,87
55	30/06/2016	01:45:00:00	23.349,67	0,86
56	30/06/2016	02:00:00:00	21.154,00	0,86
57	30/06/2016	02:15:00:00	18.561,00	0,86
58	30/06/2016	02:30:00:00	18.531,33	0,85
59	30/06/2016	02:45:00:00	19.008,33	0,86
60	30/06/2016	03:00:00:00	18.290,67	0,86
61	30/06/2016	03:15:00:00	18.584,33	0,86
62	30/06/2016	03:30:00:00	18.198,67	0,85
63	30/06/2016	03:45:00:00	17.794,00	0,85
64	30/06/2016	04:00:00:00	18.335,33	0,84
65	30/06/2016	04:15:00:00	17.336,33	0,85
66	30/06/2016	04:30:00:00	17.910,67	0,85
67	30/06/2016	04:45:00:00	17.681,33	0,84
68	30/06/2016	05:00:00:00	16.972,67	0,85
69	30/06/2016	05:15:00:00	18.388,67	0,85
70	30/06/2016	05:30:00:00	18.171,00	0,86
71	30/06/2016	05:45:00:00	18.348,33	0,86
72	30/06/2016	06:00:00:00	18.675,33	0,86
73	30/06/2016	06:15:00:00	18.280,00	0,87
74	30/06/2016	06:30:00:00	17.916,67	0,86
75	30/06/2016	06:45:00:00	21.981,33	0,88

76	30/06/2016	07:00:00:00	21.254,33	0,88
77	30/06/2016	07:15:00:00	21.592,33	0,88
78	30/06/2016	07:30:00:00	20.824,33	0,88
79	30/06/2016	07:45:00:00	17.775,00	0,86
80	30/06/2016	08:00:00:00	17.767,67	0,86
81	30/06/2016	08:15:00:00	18.036,67	0,86
82	30/06/2016	08:30:00:00	17.743,00	0,86
83	30/06/2016	08:45:00:00	17.603,33	0,85
84	30/06/2016	09:00:00:00	18.033,00	0,86
85	30/06/2016	09:15:00:00	17.843,33	0,86
86	30/06/2016	09:30:00:00	18.238,67	0,87
87	30/06/2016	09:45:00:00	19.701,00	0,87
88	30/06/2016	10:00:00:00	21.476,67	0,87
89	30/06/2016	10:15:00:00	22.240,33	0,88
90	30/06/2016	10:30:00:00	22.763,33	0,89
91	30/06/2016	10:45:00:00	24.090,00	0,89
92	30/06/2016	11:00:00:00	26.060,33	0,90
93	30/06/2016	11:15:00:00	25.215,33	0,90
94	30/06/2016	11:30:00:00	25.661,67	0,91
95	30/06/2016	11:45:00:00	26.585,00	0,89
96	30/06/2016	12:00:00:00	24.673,33	0,90
97	30/06/2016	12:15:00:00	28.433,00	0,91
98	30/06/2016	12:30:00:00	29.650,33	0,90
99	30/06/2016	12:45:00:00	29.532,67	0,90
100	30/06/2016	13:00:00:00	26.921,33	0,90
		Máximo	39.136,33	0,91
		Mínimo	16.972,67	0,84
		Média	26.279,57	0,88
		FC	0,67	demanda média/demanda máx

Subestação 3

Tabela 3: Dados coletados da Subestação 3.

Registro	Data	Hora	Pt(W)	FPt
1	27/06/2016	16:15:00:00	23.730,33	0,94
2	27/06/2016	16:30:00:00	23.534,00	0,94
3	27/06/2016	16:45:00:00	22.506,67	0,94
4	27/06/2016	17:00:00:00	23.178,67	0,94
5	27/06/2016	17:15:00:00	23.836,67	0,95
6	27/06/2016	17:30:00:00	22.492,00	0,94
7	27/06/2016	17:45:00:00	22.631,00	0,94
8	27/06/2016	18:00:00:00	23.908,67	0,94
9	27/06/2016	18:15:00:00	22.603,67	0,94
10	27/06/2016	18:30:00:00	20.765,67	0,93
11	27/06/2016	18:45:00:00	17.932,67	0,92
12	27/06/2016	19:00:00:00	17.732,00	0,92
13	27/06/2016	19:15:00:00	16.404,67	0,91
14	27/06/2016	19:30:00:00	14.697,33	0,91
15	27/06/2016	19:45:00:00	14.553,33	0,91
16	27/06/2016	20:00:00:00	14.288,67	0,91
17	27/06/2016	20:15:00:00	14.180,67	0,91
18	27/06/2016	20:30:00:00	15.078,33	0,91
19	27/06/2016	20:45:00:00	15.439,67	0,91
20	27/06/2016	21:00:00:00	14.155,67	0,90
21	27/06/2016	21:15:00:00	13.516,67	0,90
22	27/06/2016	21:30:00:00	13.535,67	0,90
23	27/06/2016	21:45:00:00	13.489,00	0,90
24	27/06/2016	22:00:00:00	13.518,67	0,90
25	27/06/2016	22:15:00:00	13.477,67	0,90
26	27/06/2016	22:30:00:00	13.411,00	0,90
27	27/06/2016	22:45:00:00	12.696,00	0,89
28	27/06/2016	23:00:00:00	10.252,33	0,86
29	27/06/2016	23:15:00:00	10.087,67	0,85
30	27/06/2016	23:30:00:00	10.047,00	0,86
31	27/06/2016	23:45:00:00	10.100,67	0,85
32	28/06/2016	00:00:00:00	10.089,00	0,85
33	28/06/2016	00:15:00:00	9.984,00	0,85
34	28/06/2016	00:30:00:00	9.950,67	0,85
35	28/06/2016	00:45:00:00	9.921,33	0,85

36	28/06/2016	01:00:00:00	9.684,00	0,84
37	28/06/2016	01:15:00:00	9.143,00	0,83
38	28/06/2016	01:30:00:00	9.175,00	0,83
39	28/06/2016	01:45:00:00	9.141,33	0,83
40	28/06/2016	02:00:00:00	9.099,33	0,83
41	28/06/2016	02:15:00:00	9.082,33	0,83
42	28/06/2016	02:30:00:00	9.105,67	0,83
43	28/06/2016	02:45:00:00	9.095,67	0,83
44	28/06/2016	03:00:00:00	9.191,00	0,82
45	28/06/2016	03:15:00:00	9.151,33	0,82
46	28/06/2016	03:30:00:00	9.206,33	0,82
47	28/06/2016	03:45:00:00	9.217,67	0,83
48	28/06/2016	04:00:00:00	9.063,00	0,82
49	28/06/2016	04:15:00:00	8.990,33	0,83
50	28/06/2016	04:30:00:00	9.105,00	0,83
51	28/06/2016	04:45:00:00	9.008,33	0,82
52	28/06/2016	05:00:00:00	9.019,33	0,82
53	28/06/2016	05:15:00:00	9.017,33	0,82
54	28/06/2016	05:30:00:00	8.864,33	0,83
55	28/06/2016	05:45:00:00	9.134,67	0,84
56	28/06/2016	06:00:00:00	8.774,67	0,83
57	28/06/2016	06:15:00:00	8.803,67	0,82
58	28/06/2016	06:30:00:00	8.847,67	0,81
59	28/06/2016	06:45:00:00	9.727,33	0,83
60	28/06/2016	07:00:00:00	9.873,67	0,83
61	28/06/2016	07:15:00:00	9.962,33	0,83
62	28/06/2016	07:30:00:00	9.929,33	0,83
63	28/06/2016	07:45:00:00	10.249,33	0,83
64	28/06/2016	08:00:00:00	10.095,00	0,83
65	28/06/2016	08:15:00:00	10.196,67	0,84
66	28/06/2016	08:30:00:00	10.583,67	0,85
67	28/06/2016	08:45:00:00	11.363,00	0,86
68	28/06/2016	09:00:00:00	11.927,33	0,87
69	28/06/2016	09:15:00:00	14.412,00	0,89
70	28/06/2016	09:30:00:00	16.820,67	0,90
71	28/06/2016	09:45:00:00	16.774,67	0,91
72	28/06/2016	10:00:00:00	17.698,33	0,92
73	28/06/2016	10:15:00:00	17.169,00	0,92
74	28/06/2016	10:30:00:00	17.984,67	0,92
75	28/06/2016	10:45:00:00	18.923,00	0,92

76	28/06/2016	11:00:00:00	18.174,67	0,92
77	28/06/2016	11:15:00:00	18.474,33	0,92
78	28/06/2016	11:30:00:00	18.690,67	0,92
79	28/06/2016	11:45:00:00	19.408,33	0,93
80	28/06/2016	12:00:00:00	19.982,33	0,93
81	28/06/2016	12:15:00:00	20.304,00	0,94
82	28/06/2016	12:30:00:00	20.646,33	0,94
83	28/06/2016	12:45:00:00	20.635,67	0,93
84	28/06/2016	13:00:00:00	20.787,67	0,93
85	28/06/2016	13:15:00:00	20.356,00	0,92
86	28/06/2016	13:30:00:00	19.360,67	0,92
87	28/06/2016	13:45:00:00	19.025,67	0,92
88	28/06/2016	14:00:00:00	19.527,33	0,92
89	28/06/2016	14:15:00:00	19.588,67	0,92
90	28/06/2016	14:30:00:00	20.337,33	0,92
91	28/06/2016	14:45:00:00	21.195,00	0,93
92	28/06/2016	15:00:00:00	21.228,33	0,93
93	28/06/2016	15:15:00:00	21.514,00	0,93
94	28/06/2016	15:30:00:00	20.452,67	0,92
95	28/06/2016	15:45:00:00	21.116,33	0,93
96	28/06/2016	16:00:00:00	20.787,67	0,93
97	28/06/2016	16:15:00:00	20.029,00	0,92
98	28/06/2016	16:30:00:00	21.030,00	0,93
99	28/06/2016	16:45:00:00	21.066,67	0,92
100	28/06/2016	17:00:00:00	21.531,00	0,93
		Máximo	23.908,67	0,95
		Mínimo	8.774,67	0,81
		Média	14.955,89	0,89
		FC	0,63	demanda média/demanda máx

Subestação 4

Tabela 4: Dados coletados da Subestação 4.

Registro	Data	Hora	Pt(W)	FPt
1	24/06/2016	19:15:00:00	72.012,33	0,95
2	24/06/2016	19:30:00:00	71.599,67	0,95
3	24/06/2016	19:45:00:00	72.349,00	0,95
4	24/06/2016	20:00:00:00	71.360,33	0,95
5	24/06/2016	20:15:00:00	71.347,67	0,95
6	24/06/2016	20:30:00:00	70.841,33	0,95
7	24/06/2016	20:45:00:00	70.707,00	0,95
8	24/06/2016	21:00:00:00	70.609,33	0,95
9	24/06/2016	21:15:00:00	70.230,67	0,95
10	24/06/2016	21:30:00:00	70.130,33	0,95
11	24/06/2016	21:45:00:00	69.875,33	0,95
12	24/06/2016	22:00:00:00	69.925,67	0,95
13	24/06/2016	22:15:00:00	69.829,00	0,95
14	24/06/2016	22:30:00:00	69.883,00	0,95
15	24/06/2016	22:45:00:00	69.845,00	0,95
16	24/06/2016	23:00:00:00	69.422,00	0,95
17	24/06/2016	23:15:00:00	69.416,33	0,95
18	24/06/2016	23:30:00:00	69.554,00	0,95
19	24/06/2016	23:45:00:00	69.603,33	0,95
20	25/06/2016	00:00:00:00	68.770,33	0,95
21	25/06/2016	00:15:00:00	68.223,00	0,95
22	25/06/2016	00:30:00:00	68.823,00	0,95
23	25/06/2016	00:45:00:00	68.572,00	0,95
24	25/06/2016	01:00:00:00	68.491,67	0,95
25	25/06/2016	01:15:00:00	68.519,67	0,95
26	25/06/2016	01:30:00:00	67.758,00	0,95
27	25/06/2016	01:45:00:00	67.361,00	0,95
28	25/06/2016	02:00:00:00	67.531,00	0,95
29	25/06/2016	02:15:00:00	66.976,67	0,95
30	25/06/2016	02:30:00:00	66.917,33	0,95
31	25/06/2016	02:45:00:00	66.542,33	0,95
32	25/06/2016	03:00:00:00	66.362,67	0,95
33	25/06/2016	03:15:00:00	66.441,00	0,95
34	25/06/2016	03:30:00:00	66.345,67	0,95
35	25/06/2016	03:45:00:00	66.506,67	0,95

36	25/06/2016	04:00:00:00	66.514,67	0,95
37	25/06/2016	04:15:00:00	66.364,67	0,95
38	25/06/2016	04:30:00:00	66.457,00	0,94
39	25/06/2016	04:45:00:00	66.527,00	0,94
40	25/06/2016	05:00:00:00	67.007,67	0,94
41	25/06/2016	05:15:00:00	66.613,67	0,94
42	25/06/2016	05:30:00:00	66.260,67	0,94
43	25/06/2016	05:45:00:00	65.962,00	0,94
44	25/06/2016	06:00:00:00	66.116,00	0,94
45	25/06/2016	06:15:00:00	66.387,00	0,94
46	25/06/2016	06:30:00:00	65.880,00	0,94
47	25/06/2016	06:45:00:00	65.538,33	0,94
48	25/06/2016	07:00:00:00	65.494,67	0,94
49	25/06/2016	07:15:00:00	65.956,00	0,94
50	25/06/2016	07:30:00:00	65.527,67	0,94
51	25/06/2016	07:45:00:00	65.684,33	0,94
52	25/06/2016	08:00:00:00	65.824,33	0,94
53	25/06/2016	08:15:00:00	66.179,33	0,94
54	25/06/2016	08:30:00:00	66.729,33	0,94
55	25/06/2016	08:45:00:00	66.875,67	0,94
56	25/06/2016	09:00:00:00	67.127,00	0,94
57	25/06/2016	09:15:00:00	67.060,67	0,94
58	25/06/2016	09:30:00:00	67.425,33	0,94
59	25/06/2016	09:45:00:00	67.403,00	0,95
60	25/06/2016	10:00:00:00	67.475,67	0,95
61	25/06/2016	10:15:00:00	67.332,33	0,95
62	25/06/2016	10:30:00:00	67.900,67	0,95
63	25/06/2016	10:45:00:00	67.729,00	0,95
64	25/06/2016	11:00:00:00	67.646,33	0,95
65	25/06/2016	11:15:00:00	67.555,67	0,94
66	25/06/2016	11:30:00:00	67.389,67	0,95
67	25/06/2016	11:45:00:00	67.411,67	0,95
68	25/06/2016	12:00:00:00	67.644,67	0,95
69	25/06/2016	12:15:00:00	67.573,67	0,95
70	25/06/2016	12:30:00:00	67.706,00	0,95
71	25/06/2016	12:45:00:00	67.758,00	0,95
72	25/06/2016	13:00:00:00	67.933,00	0,95
73	25/06/2016	13:15:00:00	68.171,33	0,95
74	25/06/2016	13:30:00:00	68.139,67	0,95
75	25/06/2016	13:45:00:00	67.769,00	0,95

76	25/06/2016	14:00:00:00	67.998,00	0,95
77	25/06/2016	14:15:00:00	67.841,67	0,95
78	25/06/2016	14:30:00:00	67.741,67	0,95
79	25/06/2016	14:45:00:00	67.575,33	0,95
80	25/06/2016	15:00:00:00	67.431,67	0,95
81	25/06/2016	15:15:00:00	67.853,67	0,95
82	25/06/2016	15:30:00:00	67.635,67	0,95
83	25/06/2016	15:45:00:00	67.920,67	0,95
84	25/06/2016	16:00:00:00	67.784,33	0,95
85	25/06/2016	16:15:00:00	67.961,33	0,95
86	25/06/2016	16:30:00:00	67.506,67	0,95
87	25/06/2016	16:45:00:00	67.113,33	0,95
88	25/06/2016	17:00:00:00	67.688,33	0,95
89	25/06/2016	17:15:00:00	68.063,67	0,95
90	25/06/2016	17:30:00:00	68.708,33	0,95
91	25/06/2016	17:45:00:00	68.958,67	0,95
92	25/06/2016	18:00:00:00	69.475,67	0,95
93	25/06/2016	18:15:00:00	69.512,00	0,95
94	25/06/2016	18:30:00:00	69.444,67	0,95
95	25/06/2016	18:45:00:00	69.382,00	0,95
96	25/06/2016	19:00:00:00	69.410,00	0,95
97	25/06/2016	19:15:00:00	68.672,67	0,95
98	25/06/2016	19:30:00:00	68.804,00	0,95
99	25/06/2016	19:45:00:00	68.484,00	0,95
100	25/06/2016	20:00:00:00	69.058,00	0,95
		Máximo	72.349,00	0,95
		Mínimo	65.494,67	0,94
		Média	68.027,62	0,95
		FC	0,94	demanda média/demanda máx