

# MODELO MULTICRITÉRIO PARA ORDENAÇÃO DOS PONTOS MONITORADOS DE UM SISTEMA ELÉTRICO COM BASE NO MÉTODO SMARTS

**Sandro Felinto da Silva**

Companhia Energética de Pernambuco - CELPE  
Av. João de Barros, 111 - Boa Vista - CEP 50050-902 - Recife - PE - Brasil  
[sfelinto@celpe.com.br](mailto:sfelinto@celpe.com.br)

**Adiel Teixeira de Almeida**

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE  
Av. Prof. Moraes Rego s/n Depto. Eng. Produção- Cidade Universitária - Recife - PE - Brasil  
[aalmeida@ufpe.br](mailto:aalmeida@ufpe.br)

## Resumo

O presente trabalho apresenta um modelo de ordenação dos pontos monitorados, de um sistema elétrico, baseado no nível de qualidade da energia elétrica, relativa aos fenômenos eletromagnéticos dos afundamentos de tensão. Tal modelo tem por base a teoria da utilidade multiatributo, mensurada através do método *SMARTS* (*Simple Multi-attribute Rating Technique using Swings*). O valor da utilidade multiatributo será obtido por meio de nove atributos relativos aos afundamentos de tensão para cada ponto monitorado e cujos valores individuais são agregados através de uma função aditiva.

**Palavras-Chaves:** Afundamento de tensão; Qualidade da energia elétrica; Utilidade Multiatributo; *SMARTS*;

## Abstract

This work presents a model for ranking the monitored points, in an electrical network, based on the electrical power quality level relative to voltage sags electromagnetic phenomena. This model is based on the multiattribute utility function, measured through *SMARTS* (*Simple Multi-attribute Rating Technique using Swings*). The multiattribute utility value will be obtained through nine attributes relative to voltage sags for each monitored points and whose individual values are aggregated through an additive function.

**Palavras-Chaves:** Voltage sag; Power quality; Multiattribute utility; *SMARTS*;

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente dos clientes das empresas distribuidoras por energia elétrica de qualidade superior, sobretudo os do segmento industrial, devido a modernização das suas instalações, com a substituição de processos produtivos robustos por sistemas automatizados que apresentam níveis de sensibilidade elevados a distorção da forma de onda e a variação da tensão de suprimento, tem exigido das concessionárias de energia investimentos adicionais na área de qualidade da energia elétrica (QEE).

Esta qualidade anteriormente avaliada por índices baseados simplesmente na frequência e duração das interrupções no fornecimento de energia, denominada qualidade do serviço, passa a necessitar de critérios que afirmam também a conformidade da forma da onda da tensão elétrica, qualidade do produto, portanto, exigindo novas estratégias de mensuração por parte das distribuidoras.

A QEE segundo a perspectiva da qualidade do produto, conformidade da onda da tensão elétrica, abrange diversos fenômenos eletromagnéticos, cujas conseqüências sobre as cargas atendidas pelas redes das distribuidoras são o mau funcionamento, redução da vida útil e eventuais queimas de equipamentos, além de desligamento de dispositivos de proteção elétrica, com conseqüente parada no processo produtivo de plantas industriais. Desta forma, o termo qualidade utilizado neste trabalho expressa a proximidade dos valores das grandezas relativas a energia elétrica de seus níveis ideais, particularmente a tensão elétrica.

Num mercado onde a concorrência foi introduzida pela privatização das empresas estaduais de distribuição, e sobretudo pela possibilidade de determinados clientes se declararem livres, e com isso poderem comprar energia de qualquer empresa comercializadora, independentemente do suprimento físico, a QEE passa a ser estratégica também, para a fidelização do mercado e na atração de novos clientes.

Neste contexto onde a QEE tornou-se fundamental para os clientes, diferencial competitivo para as concessionárias, além da introdução prevista de normas reguladoras relativas a qualidade do produto, as empresas distribuidoras precisam desenvolver procedimentos para avaliação das suas redes, segundo a ótica da qualidade. A monitoração de seu sistema elétrico é a ferramenta básica para esta avaliação e pode ser utilizada também para a definição de ações mitigadoras dos problemas reclamados e/ou identificados. Entretanto, a quantidade de dados gerados pelo sistema de monitoração, relativos aos mais diversos fenômenos eletromagnéticos, implicando na dificuldade de transformação desses dados em informações úteis às concessionárias para a administração de suas redes, torna difícil a tarefa de decidir sobre quais investimentos realizar para melhoria da qualidade do sistema elétrico, ou mesmo, quais pontos selecionar para a realização de uma análise técnica de engenharia mais aprofundada.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um modelo de ordenação das barras de um sistema elétrico com base em critérios relativos a QEE, mensurada através dos afundamentos de tensão, que determinará a barra mais indicada para a realização dos estudos técnicos de engenharia. Tal modelo utilizará a teoria da utilidade multiatributo, aplicada conforme preceitua a metodologia para sua medição, denominada de *SMARTS (Simple Multi-attribute Rating Technique using Swings)*.

## **2. SISTEMA DE MONITORAÇÃO**

A monitoração da QEE é necessária para caracterizar os diversos fenômenos eletromagnéticos presentes em uma rede elétrica. Ela pode ter como objetivo desde a avaliação da QEE presente na rede, até servir de base para a previsão de desempenho futuro de dispositivos de mitigação dos problemas. Por isso, a tarefa mais importante para o sucesso no desenvolvimento e implementação de tal sistema é a definição clara dos objetivos [8].

O sistema de monitoração da rede elétrica da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), que será utilizado para aplicação do modelo, é composto por registradores digitais de perturbação, transdutores de sinais, nobreaks, modems, linhas telefônicas e um servidor de banco de dados, onde estão instalados os programas computacionais responsáveis pelo gerenciamento e aquisição dos arquivos de dados. Em cada ponto monitorado da rede elétrica estão instalados, além do registrador digital de perturbação, um modem, um nobreak, uma linha telefônica e os transdutores de sinais. Enquanto que no escritório encontram-se instalados o servidor, um modem e uma linha telefônica.

Esse sistema é o responsável pela gravação dos dados dos afundamentos de tensão nos registradores, sua transmissão e armazenamento no servidor do banco de dados.

## **3. AFUNDAMENTO DE TENSÃO**

Os afundamentos de tensão correspondem a uma diminuição no valor da amplitude da tensão que resultem em valores maiores ou iguais a 0,1 pu (por unidade) e menores que 0,9 pu, por um curto intervalo de tempo. A sua amplitude é definida pelo menor valor da média

quadrática (valor eficaz) da tensão, em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado. Já a duração do afundamento é definida pelo intervalo de tempo decorrido, entre o instante em que o valor eficaz da tensão, em relação à tensão nominal, diminuiu de 0,9 pu e o instante em que a mesma variável torna-se maior ou igual a este limite, conforme [6]. As suas principais causas são a ocorrência de curto-circuito no sistema elétrico, sobrecargas e partidas de grandes motores elétricos.

A mensuração do nível de QEE, referente aos afundamentos de tensão, através de atributos relevantes depende diretamente da sua adequada caracterização. Sendo assim, como o nosso objetivo é avaliar a QEE em relação ao nível ideal, será adotado para contagem e valoração dos atributos o afundamento desagregado. Segundo esse critério os afundamentos são contados de acordo com o número de fases do sistema elétrico afetadas simultaneamente, considerando as respectivas amplitude e duração verificadas.

#### 4. TEORIA DA UTILIDADE MULTIATRIBUTO

A teoria da utilidade tem por objetivo desenvolver um modelo matemático que permita representar as preferências do decisor pelos resultados que poderá obter. A idéia básica é quantificar essa desejabilidade, através da associação de valores aos objetos de avaliação, proporcionando assim um critério de escolha ao decisor.

A noção de utilidade foi descrita num artigo em 1738, por Daniel Bernoulli, como unidade para medir preferências. Outro trabalho importante foi o de Jeremy Bentham, de 1789, que associou à noção da utilidade, aquela propriedade presente em qualquer objeto, pelo qual ele tende a produzir benefício, vantagem, prazer, bem estar ou felicidade [1]. Entretanto, foi a publicação do trabalho intitulado, “*Theory of Games and Economic Behavior*”, em 1947, por John von Neumann e Oskar Morgenstern, que estabeleceu as bases da teoria da utilidade e o conjunto de axiomas necessários a existência da função utilidade.

Essa teoria foi bastante empregada em problemas de decisão de critério único, na área econômica, onde as conseqüências eram expressas como valor monetário, e a função utilidade representava as preferências do decisor e explicava seu comportamento em relação ao risco.

A função utilidade quando estabelecida tendo um único atributo é denominada de função utilidade unidimensional, sendo denominada de função utilidade multiatributo quando envolver mais de um atributo.

A teoria da utilidade multiatributo, referida freqüentemente por *MAUT* (*Multi-Attribute Utility Theory*), derivou da teoria da utilidade. *MAUT* incorpora à teoria da utilidade a questão do tratamento de problemas com múltiplos objetivos, que são representados pelo que é denominado de atributos [1].

Conforme apresentado em [8], o critério fundamental presente na utilidade multiatributo, é que se qualquer coisa é valorizada no total, ela será valorada por mais de uma razão. Desta forma, qualquer resultado de uma decisão é mais naturalmente descrito por um vetor de números que está relacionado ao valor total. Logo, a tarefa do analista que deseja usar esses números, para guiar decisões, é agregar aquele vetor num escalar que o decisor deseja maximizar. Esse número deve ser medido ao menos numa escala de intervalo.

Embora receba o nome de teoria, *MAUT*, algumas vezes é utilizada como método. Essa distinção está associada a forma como se obtém a função utilidade multiatributo. Como teoria, a determinação da função está relacionada à confirmação da relação que existe entre a estrutura axiomática da teoria e a estrutura de preferências do decisor. Como método, essa confirmação não é efetuada, pelo menos em alguns estágios do processo de análise. Podemos dizer que em alguns métodos o decisor especifica parâmetros, ou condições que influenciam no processo de decisão, de forma *ad hoc*, sem um protocolo bem estruturado e suportado por uma estrutura axiomática associada [4].

Dentro do contexto dos métodos para medição da utilidade multiatributo será utilizado o método *SMARTS*, para o modelo de ordenação proposto.

## 5. SMARTS

### 5.1. INTRODUÇÃO

O método de medição para a utilidade multiatributo *SMARTS* foi desenvolvido por [3], baseado num procedimento de elicitação dos pesos dos atributos. Ele foi derivado da metodologia denominada de *SMART (Simple Multi-attribute Rating Technique)* proposta por [2].

*SMART* apresentava um erro intelectual que consistia em desconsiderar o fato dos pesos elicitados refletirem sobre a faixa de valores do atributo “pesado”, assim como na sua importância. *SMARTS* remediou esse erro pelo uso de uma invenção denominada balança de pesos.

Esse método possui duas idéias chave subjacentes para sua aplicação. A primeira corresponde ao conceito de utilidade multiatributo empregado, que considera que qualquer “coisa” é valorizada no total por mais de uma razão, desta forma deve ser estabelecido um conjunto de valores escalares que deverá ser agregado. A segunda é o que eles chamam de “*strategy of heroic approximation*”, estratégia de aproximação heróica. Essa estratégia diz respeito a duas crenças que motivaram o desenvolvimento do método. A primeira é que ferramentas mais simples são mais fáceis de usar e logo tem mais possibilidade de serem úteis. E a segunda é que a chave para apropriar métodos de seleção é se preocupar sobre o *trade-off* existente entre o erro de modelagem e o erro de elicitação. Edwards [2] acreditava que os julgamentos de indiferença requeridos por [5], entre pares de opções hipotéticas eram difíceis e instáveis. Ele acreditava que avaliações mais diretas das quantidades desejadas são mais fáceis e menos prováveis de produzirem erros de elicitação.

*SMARTS* usa a estratégia de aproximação heróica para justificar aproximações lineares de funções de utilidades de única dimensão e usa um modelo de agregação aditiva.

Descritas as idéias chave presentes no método passaremos a detalhar os procedimentos necessários para sua aplicação.

### 5.2. PROCEDIMENTOS PARA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO *SMARTS*

O método *SMARTS*, conforme proposto em [3] é empregado através de um procedimento de oito passos, que estão listados a seguir.

Passo 1: *Identificar o propósito da decisão e decisores*. Como primeiro passo deve ser identificado o propósito da elicitação dos valores, e o indivíduo, organização, ou organizações das quais os valores deveriam ser elicitados.

Passo 2: *Árvore de Valor*. Neste passo deve ser elicitado uma estrutura ou a lista de atributos potencialmente relevante ao propósito da decisão. Se possível, todos os elicitados deveriam chegar a concordância sobre a estrutura e composição dos objetivos (sem ordenação ou pesos) relevantes. É sugerida a redução do número de atributos para menos de 12, pela combinação de atributos relacionados e pela eliminação daqueles que receberiam baixo peso relativo.

Passo 3: *Objetos de Avaliação, Identificação de Alternativas*. Se o propósito da elicitação não determinou os objetos de avaliação, isto é, as alternativas, use a estrutura de atributos do passo 2 para defini-las. Se alternativas reais não estão disponíveis, alternativas hipotéticas devem cobrir toda a faixa de valores que poderão ser encontrados.

Passo 4: *Matriz de objetos por atributos*. Formule uma matriz de alternativas, por atributos. Suas entradas devem ser pontuadas com valores relativos a medições físicas, caso seja possível. Se medições físicas não são possíveis, medidas subjetivas podem ser usadas, com suas entradas sendo julgadas utilidades de única dimensão.

Passo 5: *Opções dominadas*. Elimine ordinalmente as opções dominadas. Se por acaso você perceber uma ou mais opções dominadas cardinalmente, elimine-as também. Isto reduz o número total de opções, mas é improvável que afete a faixa de valores de qualquer atributo. Caso a eliminação de alguma opção tenha reduzido substancialmente a faixa dos

valores, considere se o atributo ainda merece ser usado. Se não, retorne ao passo 2 para eliminar o atributo.

Passo 6: *Utilidades de única dimensão*. Este passo consiste em converter as entradas da matriz de objetos por atributos, para utilidades de única dimensão. Para fazer isso, primeiro é necessário testar a linearidade das utilidades de única dimensão para cada atributo para o qual contadores físicos estão disponíveis. Se o uso da linearidade como uma aproximação é justificado, use as faixas dos contadores, ou uma faixa mais larga, se a verdadeira faixa parece pequena demais e a lista completa de objetos de avaliação não está disponível para especificar o limite superior e o limite inferior para as funções de utilidades de única dimensão. Calcule utilidades de única dimensão por equações lineares para essas funções ou aproxime-as como gráficos de leituras pontuais.

Passo 7: *Balança de pesagem*. Esse passo é responsável pela obtenção da ordem de importância dos atributos, em relação aos seus pesos. Em [3] está descrito a utilização da balança de pesos como requerendo dois passos de julgamento, um fácil (Passo 7) e outro difícil (Passo 8). Esse processo é realizado propondo-se a seguinte questão ao decisor: “Imagine uma nova alternativa que tenha o pior resultado possível, em todas as dimensões de valor, ou seja, a pior alternativa que poderia existir. Você pode melhorar uma única dimensão do pior para o melhor valor. Qual dos atributos  $k$  você melhoraria?” O decisor selecionaria um dos objetivos  $k$ . A próxima indagação seria qual das dimensões entre as restantes, seria a preferida para mudar do pior para o melhor valor. Isso continuaria até que todos os atributos fossem escolhidos. O objetivo, atributo, mais importante será o escolhido primeiro na operação da balança, enquanto que o selecionado por último será o menos importante.

Passo 8: *Cálculo dos Pesos da Balança*. Neste passo deverão ser elicitados os pesos da balança. Existem vários métodos para realização deste passo. O método via estimativas diretas da magnitude dos pesos corresponde a atribuir a dimensão de valor mais importante, por exemplo, 100 pontos. E depois, para cada um dos atributos restantes determinar pontuações nesta escala, de 0 a 100 pontos. A normalização dos pontos atribuídos a cada dimensão de valor corresponderá aos pesos.

Outras formas de obter a valoração dos pesos das dimensões de valor são através da comparação entre as alternativas. Entretanto, a maioria dos decisores prefere e tem mais confiança no resultado de procedimentos baseados em estimativas diretas da magnitude dos pesos, que naqueles resultantes do julgamento de indiferenças, pois, tanto são mais fáceis para explicar, quanto para realizar [3]. O resultado de ambos os procedimentos deve ser o mesmo.

Passo 9: *Decisão*. Calcula-se o valor da utilidade multiatributo para cada alternativa de acordo com:

$$U_h = \sum_{k=1}^K w_k u_h(x_{hk}). \quad (1)$$

onde:

$U_h$  - utilidade multiatributo do objeto de avaliação  $h$ ,

$w_k$  - peso do atributo de ordem  $k$ , e

$u_h(x_{hk})$  - utilidade de única dimensão do atributo  $k$ , do objeto de avaliação  $h$ ,

e se obtém uma lista ordenada das alternativas. Os pressupostos de validade para aplicação da Equação 1, foram testados no passo 6.

## 6. MODELO PROPOSTO

A construção de qualquer modelo formal de apoio à decisão deve definir claramente as regras de trabalho a serem utilizadas, qual o problema a ser resolvido, qual método será empregado, qual o objetivo almejado, como utilizar as informações disponíveis e como explicitar as preferências dos decisores e sua visão do problema em estudo.

Como tal, o método de mensuração da utilidade multiatributo *SMARTS*, escolhido para resolução do problema de ordenação em análise, preceitua essas necessidades. Sendo assim, passaremos a descrever os condicionantes relativos ao problema em questão e o modelo proposto para sua resolução.

### **6.1. DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA**

A monitoração da QEE das redes gera uma grande quantidade de dados relativos aos mais diversos fenômenos eletromagnéticos, que por sua vez necessitam de tratamentos posteriores para serem transformados em informações úteis ao gestor do sistema.

Dentre os fenômenos que estão presentes nas redes elétricas, um se destaca como sendo o maior responsável pelos problemas relacionados a qualidade do produto energia elétrica, os afundamentos de tensão, que são responsáveis por mais de 90% dos desligamentos de cargas.

Uma característica importante relativa aos afundamentos de tensão é que embora existam várias maneiras consagradas para sua contabilização, essas parametrizações não prescrevem um modo de agregação para compor um indicador único. Além disso, a simples contagem dos afundamentos de tensão presentes em determinado barramento do sistema elétrico não determinam o nível de QEE associado àquele ponto, pois tal mensuração depende do tipo de carga alimentada, mais precisamente da sua sensibilidade aos afundamentos.

Essas características tornam complexa a tarefa da avaliação técnica do nível de QEE relativa aos afundamentos de tensão, pois além de requererem uma grande quantidade de dados provenientes do sistema de monitoração, requerem uma descrição detalhada da carga conectada ao barramento, além do registro do impacto de cada afundamento gravado pelo sistema de monitoramento nas cargas alimentadas, que é feito de modo manual para todas as cargas e pelo seu usuário.

Diante disto, será proposto um modelo para ordenação das barras do sistema elétrico, baseado no nível de QEE, relativa aos afundamentos de tensão, que terá como objetivo principal ordenar as barras, conforme a sua maior importância para a realização dos estudos técnicos de melhoria e mitigação dos problemas de QEE, advindos dos afundamentos de tensão.

As principais contribuições deste modelo são a possibilidade de redução na quantidade de pontos elétricos a terem estudos de melhoria da QEE realizados, reduzindo o volume de dados necessários e contribuindo para a realização de trabalhos técnicos mais focados. Além disso, a própria mensuração do nível de QEE presentes nas barras monitoradas, em relação aos afundamentos de tensão, representa um ganho, pois dá condições para a elaboração de políticas específicas para administração do sistema elétrico.

A ordenação das barras será realizada utilizando o método *SMARTS*, conforme proposto em [3]. Este método é considerado conveniente a tal aplicação, por utilizar mecanismos que reduzem a dificuldade da explicitação das preferências do gestor da QEE, e a conseqüente transformação em valores de utilidades dos atributos relacionados aos afundamentos de tensão, além de construir um critério de síntese único através da agregação aditiva.

### **6.2. DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS**

A caracterização dos afundamentos de tensão para utilização no modelo proposto, através da definição dos atributos relevantes ao problema em análise, constitui-se num passo fundamental, pois todo tratamento subsequente depende da qualidade desses descritores. Tais atributos devem descrever completamente os objetos de avaliação, possibilitando a medição de todos os valores relevantes para a ordenação dos pontos monitorados segundo o nível de QEE relativos aos afundamentos. Além disso, os atributos definidos devem atender as condições necessárias, previstas em [3], para a aplicação do método *SMARTS*.

Desta forma, é necessário que a medição vinculada a cada atributo considerado isoladamente deva, preferivelmente, não apresentar ambigüidades, assim como ter

independência condicional, quando considerados dois a dois. Além disso, a função utilidade de única dimensão associada a cada atributo deverá ser monotônica e não apresentar uma grande curvatura, para que a aproximação linear seja apropriada. Essas qualidades permitem a utilização da agregação aditiva para o cálculo da utilidade multiatributo. Outra característica desejável aos atributos é a sua mensuração através de valores relativos a medições físicas [3].

Tendo em mente os condicionantes expostos acima, foram criados três atributos para caracterizar os afundamentos de tensão que se desdobram num total de nove. Os valores dos atributos foram calculados a partir dos arquivos dos registradores digitais de perturbação referentes aos afundamentos, através de um programa desenvolvido no *Microsoft Access 2000*, da *Microsoft Corporation*.

Os atributos propostos atendem todas condições exigidas para aplicação do método *SMARTS*, conforme poderá ser visto. Entretanto é necessário evidenciar a adequação da aproximação linear, no que diz respeito a curvatura da função utilidade de única dimensão, referente aos atributos duração relativa e valor médio dos afundamentos de tensão. Pois, notadamente a mesma variação de valores da duração relativa poderia ter um impacto diferente em relação a utilidade do valor médio dos afundamentos de tensão, dependendo do ponto da escala desta utilidade onde tal variação fosse considerada, caso estivesse em análise a consequência dos afundamentos de tensão sobre a carga alimentada no ponto monitorado. Contudo, como o objetivo do modelo é mensurar o nível de QEE, relativa aos afundamentos de tensão, e prover a ordenação dos pontos monitorados segundo a perspectiva do desvio em relação à qualidade tida como ideal, o modelo linear é perfeitamente adequado, pois não é influenciado pela característica descrita acima.

O cálculo dos valores dos atributos se baseia na desagregação de cada um dos afundamentos de tensão, onde cada evento registrado é desdobrado, em tantos quanto forem os períodos comuns de tempo, por quantidades de fases, que sofreram efetivamente afundamento. Desta forma, para cada evento de afundamento registrado, são contadas as durações e amplitudes máximas, de cada período de tempo em que 1, 2 ou 3 das fases apresentaram valores de tensão maiores ou iguais a 0,1 pu e menores que 0,9 pu, simultaneamente.

A desagregação dos afundamentos de tensão é um modo conveniente para sua valoração visando à mensuração da QEE, pois, contabiliza todos os desvios provocados por tais fenômenos em relação a qualidade tida como ideal. É importante destacar que essa forma de contagem dos afundamentos de tensão não corresponde à maneira corriqueira de contabilização desses eventos.

### **6.2.1. Quantidade Relativa de Afundamentos por Fases Afetadas**

O primeiro atributo proposto é a quantidade relativa de afundamentos por fases afetadas, sendo obtido a partir da contagem total desses eventos por quantidade de fases afetadas. Seu valor é calculado para cada ponto monitorado pela relação entre a quantidade de afundamentos registrados no local, e o total de afundamentos gravados, considerando todos os pontos monitorados, apurados separadamente para 1, 2, ou 3 fases afetadas, no período de tempo correspondente.

Seu objetivo principal é avaliar as quantidades relativas de afundamentos, por fases afetadas, em cada ponto monitorado, medindo assim o desvio em relação ao nível da QEE tida como ideal, no que diz respeito ao número de afundamentos verificados. Além disso, eles possibilitam uma ordenação consistente das barras monitoradas.

### **6.2.2. Duração Relativa dos Afundamentos por Fases Afetadas**

O segundo atributo proposto, duração relativa dos afundamentos, é obtido pelo cálculo da relação entre o total das durações dos afundamentos de tensão no ponto e o total das durações em todos os pontos do sistema de monitoração, calculado para cada quantidade de fases afetadas.

Esse atributo afere o desvio no nível da QEE em relação à qualidade ideal no que diz respeito a duração dos afundamentos de tensão, possibilitando também uma ordenação consistente das barras monitoradas.

### 6.2.3. Valor Médio dos Afundamentos por Fases Afetadas

O terceiro e último atributo é o valor médio dos afundamentos de tensão, que é obtido pelo cálculo da média aritmética das diferenças entre o nível de tensão considerado normal, sem afundamento, 0,9 pu, e o menor valor de tensão registrado durante cada afundamento, para cada ponto monitorado e separados por quantidade de fases afetadas. Os valores são calculados considerando as tensões expressas em por unidade (pu).

Seu objetivo principal é medir com relação à amplitude dos afundamentos de tensão o desvio da qualidade em relação a QEE ideal.

### 6.3. OBJETOS DE AVALIAÇÃO

Os objetos de avaliação ou alternativas, como mais comumente são designados, correspondem ao conjunto de barras do sistema elétrico que possuem monitoração relativa aos afundamentos de tensão, que se deseja avaliar. Esse conjunto terá a abrangência ditada pelo objetivo do estudo em desenvolvimento, sendo assim, o modelo de ordenação proposto poderá ser utilizado tanto para pequenas, como para grandes regiões elétricas.

### 6.4. UTILIDADES DE ÚNICA DIMENSÃO

A transformação dos valores de todos atributos do modelo proposto, medidas físicas, relativas aos objetos de avaliação, em utilidades cardinais de única dimensão será feita de modo direto através da função identidade,

$$u_k(x_{hk}) = x_{hk} \quad (2)$$

onde:  $u_h(x_{hk})$  é a utilidade de única dimensão do atributo  $k$ , do objeto de avaliação  $h$  e  $x_{hk}$  é o valor do atributo  $k$ , da alternativa  $h$ .

A utilização da função identidade para transformação dos valores dos atributos em utilidades de única dimensão é baseada, conforme preceitua a metodologia apresentada na base conceitual, no atendimento as condições de monotonicidade crescente, verificada em todos os atributos do modelo, bem como na consideração de linearidade como uma aproximação válida para todos eles. Além disso, a medição de todos os atributos resultará em valores compreendidos no intervalo entre zero e um, escala considerada adequada para exprimir essas utilidades de única dimensão.

A preferência do decisor por quantidades maiores dos atributos diz respeito ao maior interesse na realização de estudos técnicos em pontos do sistema elétrico considerados mais degradados em relação a QEE ideal.

### 6.5. UTILIDADE MULTIATRIBUTO

O modelo utilizará a agregação aditiva para cálculo da utilidade multiatributo, mensurada pelo método *SMARTS*, pois todos os atributos são condicionalmente monotônicos um com relação aos outros. Além disso, os atributos satisfazem a condição de independência aditiva em utilidade, pois, a preferência por um determinado atributo, não depende de um nível particular de outro, quando considerado que o modelo de ordenação proposto busca captar o nível de QEE presente nos pontos monitorados, não a consequência dos afundamentos de tensão em relação às cargas supridas a partir do ponto. Desta forma a utilidade multiatributo será calculada através da Equação 1.

### 6.6. O GRAU DE IMPORTÂNCIA DOS ATRIBUTOS

A ordem de importância dos atributos, dos afundamentos de tensão, será elicitada do gestor da área de QEE da CELPE, responsável pela monitoração do sistema elétrico, através do detalhamento dos condicionantes presentes na metodologia de mensuração da utilidade multiatributo *SMARTS*. A estimativa dos valores dos pesos dos atributos será obtida pela



elicitação direta de seus valores, através da mensuração de sua importância pela atribuição de pontos numa escala que varia de zero a cem, que a seguir terão seus valores normalizados.

## 7. ESTUDO DE CASO

O estudo de aplicação do modelo proposto para ordenação das barras monitoradas, através do nível de QEE relacionado aos afundamentos de tensão, baseado na metodologia *SMARTS*, será desenvolvido para uma rede elétrica do sistema da CELPE.

### 7.1. REDE ELÉTRICA

A Figura 1 a seguir mostra um diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico da CELPE onde será aplicado o modelo ordenação proposto. Essa rede supre uma parte bastante industrializada da Região Metropolitana do Recife. Como pode ser visto na Figura 1 as barras que possuem registradores digitais de perturbação instalados encontram-se indicadas conforme a legenda adotada. É importante destacar que foram suprimidas algumas barras do sistema elétrico para simplificação da representação, no entanto sem prejudicar a análise, e que as designações das barras foram codificadas, visando à manutenção da confidencialidade das informações consideradas estratégicas pela empresa.

### 7.2. APLICAÇÃO DO MÉTODO *SMARTS*

Os passos a seguir descrevem a aplicação da metodologia *SMARTS* para o modelo de ordenação proposto.

**Passo 1: Propósito do Modelo e Decisor.** O modelo tem como propósito, conforme descrito anteriormente, ordenar o conjunto de barras que possuam monitoração da QEE, da rede elétrica mostrada na Figura 1, com relação aos afundamentos de tensão, de acordo com o nível da qualidade mensurada, visando dar suporte ao decisor para a escolha dos pontos mais adequados para a realização de estudos técnicos de engenharia para melhoria da QEE, assim como, para auxiliá-lo na definição de políticas para gestão do sistema elétrico. O decisor neste contexto será o gestor da área de QEE da CELPE, que é o responsável pela monitoração do sistema elétrico.

**Passo 2: Árvore de valor.** Conforme descrito anteriormente foram considerados como atributos relevantes para valoração dos afundamentos de tensão, a quantidade relativa de afundamentos, sua duração relativa e seu valor médio, para cada quantidade de fases afetadas.

**Passo 3: Objetos de Avaliação ou Alternativas.** Os objetos de avaliação correspondem às barras do sistema elétrico, utilizado para aplicação do modelo proposto, com monitoração dos afundamentos de tensão (vide Figura 1).

**Passo 4: Matriz de Objetos de Avaliação por Atributos.** A Tabela 1 mostra a quantidade de ocorrências registradas em cada registrador, nos pontos monitorados, e os atributos oriundos da quantidade relativa de afundamentos de tensão. Eles são calculados pela relação entre a quantidade de afundamentos do local e a quantidade total de afundamentos no sistema elétrico, para cada quantidade de fases afetadas.

A seguir mostramos na Tabela 2, a duração total dos afundamentos de tensão e os valores dos atributos devidos a duração relativa destes eventos, que são calculados pela relação entre a duração total de todos os afundamentos do ponto e a duração total de todos os afundamentos de todos os pontos monitorados, calculados para 1, 2 e 3 fases.

A Tabela 3, a seguir, mostra a tensão média e o afundamento médio resultantes, registrados nos locais monitorados, por quantidade de fases afetadas. Os valores dos atributos dos afundamentos médios representam a diferença entre a tensão considerada normal, sem afundamento das barras (0,9 pu), e a menor tensão registrada em cada afundamento de tensão, medidos em por unidade (pu).

**Passo 5: Opções Dominadas.** Pela inspeção nos valores dos atributos das Tabelas 1, 2 e 3, não é identificada nenhuma alternativa dominada, bem como nenhuma alternativa que seja dominante, para todos os atributos considerados.

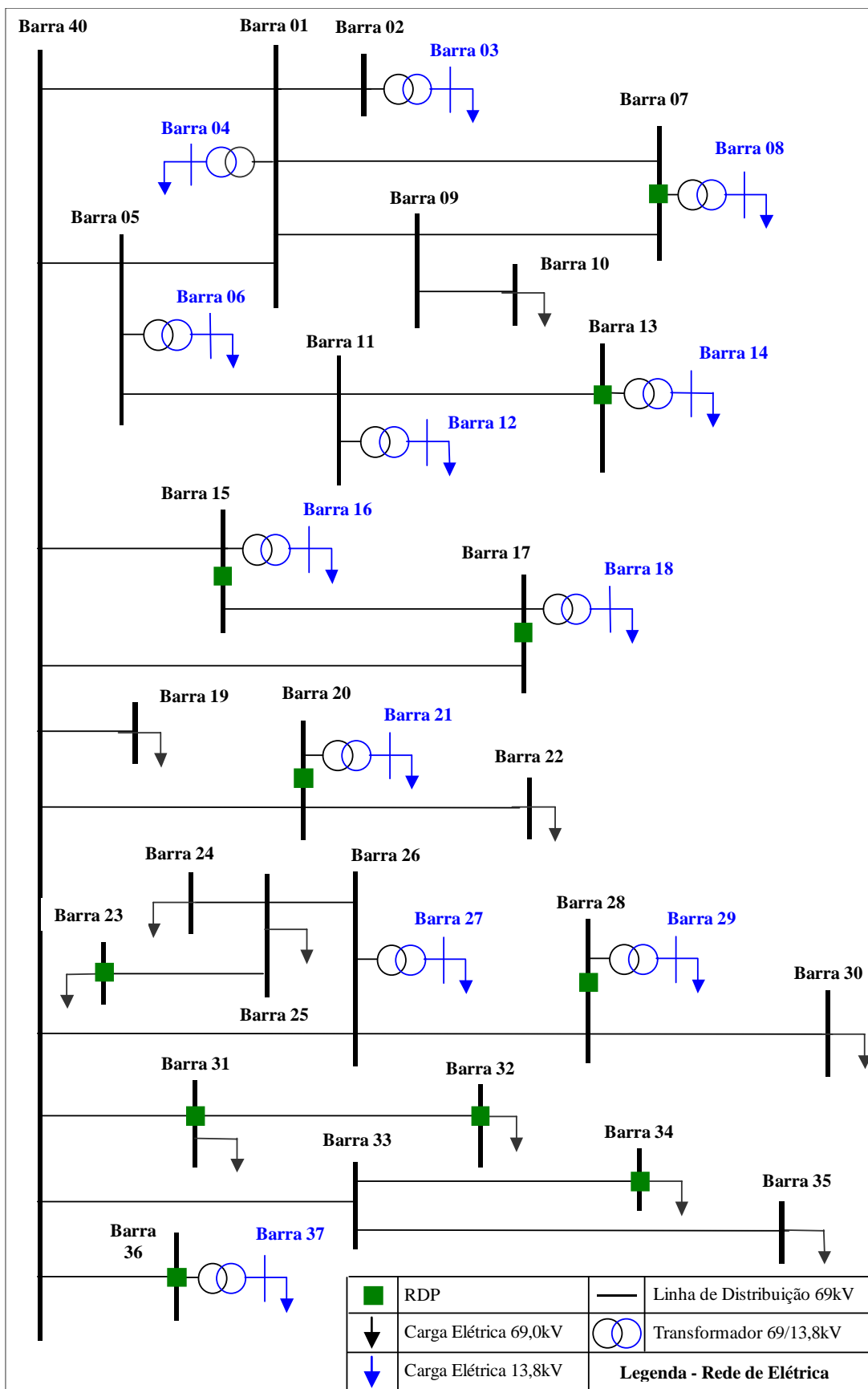


Figura 1 - Diagrama Unifilar Simplificado do Sistema Elétrico utilizado para aplicação do modelo.

Tabela 1 - Quantidade total e relativa de afundamentos de tensão por número de fases afetadas.

Ponto de Monitoração	Quantidade de Afundamentos de Tensão por Fases Afetadas				Quantidade Relativa de Afundamentos de Tensão por Fases Afetadas		
	Número de Fases Afetadas			Total	Número de Fases Afetadas		
	1	2	3		1	2	3
Barra 07	32	10	5	47	0,2078	0,1538	0,1563
Barra 13	18	3	2	23	0,1169	0,0462	0,0625
Barra 15	23	13	7	43	0,1494	0,2000	0,2188
Barra 17	29	12	4	45	0,1883	0,1846	0,1250
Barra 20	4	3	1	8	0,0260	0,0462	0,0313
Barra 23	5	3	2	10	0,0325	0,0462	0,0625
Barra 28	6	2	2	10	0,0390	0,0308	0,0625
Barra 31	5	3	2	10	0,0325	0,0462	0,0625
Barra 32	6	5	3	14	0,0390	0,0769	0,0938
Barra 34	7	5	3	15	0,0455	0,0769	0,0938
Barra 36	19	6	1	26	0,1234	0,0923	0,0313
Total Geral	154	65	32	251	----	----	----

Tabela 2 - Duração total e relativa dos afundamentos de tensão por número de fases afetadas.

Ponto de Monitoração	Duração dos Afundamentos de Tensão por Fases Afetadas (ciclo)				Duração Relativa dos Afundamentos de Tensão por Fases Afetadas		
	Número de Fases Afetadas			Total	Número de Fases Afetadas		
	1	2	3		1	2	3
Barra 07	265	93	105	463	0,2169	0,1255	0,2011
Barra 13	46	87	3	136	0,0376	0,1174	0,0057
Barra 15	254	124	21	399	0,2079	0,1673	0,0402
Barra 17	282	115	19	416	0,2308	0,1552	0,0364
Barra 20	42	9	87	138	0,0344	0,0121	0,1667
Barra 23	28	52	3	83	0,0229	0,0702	0,0057
Barra 28	58	47	4	109	0,0475	0,0634	0,0077
Barra 31	46	40	88	174	0,0376	0,0540	0,1686
Barra 32	59	51	92	202	0,0483	0,0688	0,1762
Barra 34	51	64	99	214	0,0417	0,0864	0,1897
Barra 36	91	59	1	151	0,0745	0,0796	0,0019
Total Geral	1222	741	522	2485	----	----	----

Tabela 3 - Tensão Resultante e Afundamento de Tensão Médio por número de fases afetadas.

Ponto de Monitoração	Tensão Média por Fases Afetadas (pu)			Afundamento Médio de Tensão por Fases Afetadas (pu)		
	Número de Fases Afetadas			Número de Fases Afetadas		
	1	2	3	1	2	3
Barra 07	0,8666	0,8375	0,7491	0,0334	0,0625	0,1509
Barra 13	0,8706	0,8202	0,7391	0,0294	0,0798	0,1609
Barra 15	0,8477	0,8138	0,7620	0,0523	0,0862	0,1380
Barra 17	0,8530	0,8247	0,7844	0,0470	0,0753	0,1156
Barra 20	0,8041	0,8394	0,6613	0,0959	0,0606	0,2387
Barra 23	0,8800	0,8232	0,7632	0,0200	0,0768	0,1368
Barra 28	0,8841	0,8244	0,7813	0,0159	0,0756	0,1187
Barra 31	0,8171	0,8007	0,6901	0,0829	0,0993	0,2099
Barra 32	0,8285	0,8163	0,7434	0,0715	0,0837	0,1566
Barra 34	0,8313	0,8369	0,7248	0,0687	0,0631	0,1752
Barra 36	0,8337	0,8189	0,6684	0,0663	0,0811	0,2316

Passo 6: Utilidades Unidimensionais. Os valores das utilidades de única dimensão, ou seja, os valores das utilidades para cada atributo serão considerados numericamente iguais aos valores dos atributos, pois como explicado anteriormente será utilizada a função identidade para transformação dos valores dos atributos em utilidades unidimensionais, de acordo com a “estratégia de aproximação heróica”, apresentada em [3].

Passo 7: Balança de Pesagem. Esse passo se constitui na obtenção da ordem de importância dos atributos, de acordo com o julgamento de decisor. Conforme procedimento descrito em [3] foi realizada uma entrevista de elicitación com o decisor. Nesta entrevista foi pedido primeiramente ao decisor que imaginasse um ponto de monitoração que tivesse valor zero em todos os atributos dos afundamentos de tensão. Depois lhe foi perguntado qual dos atributos ele escolheria para passar do valor zero para o valor máximo, de modo a tornar este ponto de monitoração interessante para a realização dos estudos técnicos de melhoria da QEE. O decisor escolheu o afundamento médio com 3 fases afetadas. De modo a varrer todos os atributos foi repetida a pergunta ao decisor que deveria sempre escolher um atributo ainda não selecionado. A ordem de escolha dos atributos corresponde a seqüência representativa de sua ordem de importância no problema em análise. Para o modelo em aplicação, o decisor julgou mais importantes os atributos relacionados ao valor do afundamento médio, depois os relativos a duração, e por fim, os relacionados à quantidade. Sendo sempre mais importantes os que afetam mais fases, para cada atributo.

Passo 8: Balança de Pesagem. A segunda parte da balança de pesagem consiste na valoração dos pesos dos atributos. Partindo da ordem de importância dos atributos obtida no passo anterior foram elicitados do decisor os valores dos pesos dos atributos. Esses valores foram obtidos via estimativas diretas numa escala entre 0 e 100 pontos, onde foi solicitado ao decisor que considerando o valor 100 como do atributo mais importante, afundamento médio com 3 fases afetadas, fosse atribuindo valores dentro dessa escala para os outros atributos. O resultado dessa elicitación está resumido na Tabela 4, que mostra os atributos por ordem de importância, os valores das magnitudes dos pesos e seus valores normalizados.

*Tabela 4 - Valores dos pesos dos atributos, ordenados segundo sua importância.*

Atributo	Peso	
	Magnitude	Valor Normalizado
Afundamento Médio de Tensão com 3 Fases Afetadas	100	0,3333
Afundamento Médio de Tensão com 2 Fases Afetadas	57	0,1900
Afundamento Médio de Tensão com 1 Fase Afetada	40	0,1333
Duração Relativa dos Afundamentos com 3 Fases Afetadas	34	0,1133
Duração Relativa dos Afundamentos com 2 Fases Afetadas	23	0,0767
Duração Relativa dos Afundamentos com 1 Fase Afetada	17	0,0567
Quantidade Relativa dos Afundamentos com 3 Fases Afetadas	14	0,0467
Quantidade Relativa dos Afundamentos com 2 Fases Afetadas	9	0,0300
Quantidade Relativa dos Afundamentos com 1 Fase Afetada	6	0,0200

Passo 9: Decisão. Elicitados os valores dos pesos dos atributos, procede-se o cálculo da utilidade multiatributo através da Equação 1, para cada ponto de monitoração. Para ilustrar o procedimento calculamos abaixo o valor da utilidade multiatributo da barra 23. Os valores das utilidades multiatributo estão mostrados na Tabela 5, onde pode ser observada a ordenação obtida. Além disso, o ponto de monitoração mais indicado para a realização dos estudos técnicos de melhoria da QEE corresponde a Barra 31 da rede. A ordenação obtida fornece ao decisor, responsável pelo gerenciamento do sistema de monitoração, uma visão global do nível de QEE, relativa aos afundamentos de tensão.

$$U_h = \sum_{k=1}^K w_k u_h(x_{hk})$$

$$U_{\text{Barra23}} = \left( 0,0325 \cdot 0,02 + 0,0462 \cdot 0,03 + 0,0625 \cdot 0,0467 + 0,0229 \cdot 0,0567 + 0,0702 \cdot 0,0767 + \right. \\ \left. + 0,0057 \cdot 0,1133 + 0,02 \cdot 0,1333 + 0,0768 \cdot 0,19 + 0,1368 \cdot 0,3333 \right)$$

$$U_{\text{Barra23}} = 0,0751$$

Tabela 5 - Valores das utilidades multiatributos.

Ponto de Monitoração	Utilidade Multiatributo
Barra 31	0,1302
Barra 20	0,1290
Barra 07	0,1274
Barra 36	0,1187
Barra 15	0,1177
Barra 34	0,1176
Barra 32	0,1131
Barra 17	0,1033
Barra 13	0,0911
Barra 23	0,0751
Barra 28	0,0691

### 7.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade consistirá na variação dos valores dos pesos elicitados do decisor para cada atributo, utilizado no cálculo da utilidade multiatributo pelo método *SMARTS*, e terá como objetivo verificar o impacto sobre a ordenação obtida dos pontos monitorados. A alteração nos valores dos pesos dos atributos será realizada tanto para mais, quanto para menos, sendo procedida para um único atributo por vez, que terá como valores limites os pesos dos atributos subseqüentes na ordem de importância. A diferença no valor do peso do atributo alterado será compensada nos valores dos pesos dos outros atributos de acordo com seus valores relativos, de modo que a soma de todos os pesos continue perfazendo a unidade. A seguir descreveremos a análise de sensibilidade para o valor do peso do atributo afundamento médio de tensão com 3 fases afetadas e mostraremos na Tabela 6 um resumo com os resultados da análise para todos os pesos dos atributos.

- Afundamento médio de tensão com 3 fases afetadas: Um incremento maior que 0,52% no valor do peso desse atributo resulta numa inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição. Enquanto que um decréscimo, além de 2,1%, no valor do peso deste atributo provoca uma inversão na ordenação das barras entre a 4ª e a 5ª posição.

Dos resultados da análise de sensibilidade apresentados na Tabela 6, podemos constatar que quando são procedidas alterações na ordenação original do método *SMARTS*, provenientes de pequenas variações nos valores dos pesos, como é o caso para o atributo afundamento médio de tensão com 3 fases afetadas, essas alterações não ocorrem nas posições de topo da ordenação. As alterações na ordem dos pontos monitorados com maiores valores de utilidades multiatributo só ocorrem para variações significativas nos valores dos pesos.

Tabela 6 - Resultados da Análise de Sensibilidade.

<b>Atributo</b>	<b>Alteração no valor do peso</b>	<b>Valor</b>	<b>Consequência em relação a ordenação original de SMARTS</b>
Afundamento Médio de Tensão com 3 Fases Afetadas	Incremento	> 0,52%	Inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição.
	Decremento	> 2,1%	Inversão na ordenação das barras entre a 4ª e a 5ª posição.
Afundamento Médio de Tensão com 2 Fases Afetadas	Incremento	53,4%	Não apresenta nenhuma alteração na ordenação dentro dos limites dos valores dos pesos.
	Decremento	> 1,8%	Inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição.
Afundamento Médio de Tensão com 1 Fase Afetada	Incremento	> 3,8%	Inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição.
	Decremento	> 13,3%	Não apresenta nenhuma alteração na ordenação dentro dos limites dos valores dos pesos.
Duração Relativa dos Afundamentos com 3 Fases Afetadas	Incremento	> 0,51%	Inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição.
	Decremento	> 29,7%	Não apresenta nenhuma alteração na ordenação dentro dos limites dos valores dos pesos.
Duração Relativa dos Afundamentos com 2 Fases Afetadas	Incremento	> 13,2%	Inversão na ordenação das barras entre a 4ª e a 5ª posição.
	Decremento	> 1,46%	Inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição.
Duração Relativa dos Afundamentos com 1 Fase Afetada	Incremento	> 12,0%	Inversão na ordenação das barras entre a 4ª e a 5ª posição.
	Decremento	> 1,0%	Inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição.
Quantidade Relativa dos Afundamentos com 3 Fases Afetadas	Incremento	> 10,5%	Inversão na ordenação das barras entre a 4ª e a 5ª posição.
	Decremento	> 1,6%	Inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição.
Quantidade Relativa dos Afundamentos com 2 Fases Afetadas	Incremento	29,0%	Inversão na ordenação das barras entre a 4ª e a 5ª posição.
	Decremento	> 2,58%	Inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição.
Quantidade Relativa dos Afundamentos com 1 Fase Afetada	Incremento	> 41,3%	Inversão na ordenação das barras entre a 2ª e a 3ª posição.
	Decremento	> 4,63%	Inversão na ordenação das barras entre a 5ª e a 6ª posição.

## 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme descrito no decorrer do trabalho, o elemento essencial para a avaliação da QEE, seja objetivando a verificação dos fenômenos eletromagnéticos presentes na rede, ou para auxiliar na indicação de soluções para mitigação dos problemas relacionados a QEE, corresponde a monitoração do sistema elétrico por parte das empresas distribuidoras de energia. Entretanto, tal monitoração por si só não é capaz de mensurar o nível de QEE, principalmente no que concerne ao fenômeno mais presente e de maior abrangência, que são os afundamentos de tensão. Outro aspecto relevante para a análise da QEE referente aos afundamentos de tensão é a grande quantidade de dados, pois além da quantidade gerada pelo sistema de monitoração, são necessários dados técnicos do sistema elétrico e os dados relativos a operação elétrica diária da rede e dos clientes.

Sendo assim, foi proposto um modelo de ordenação baseado na mensuração da utilidade multiatributo, desenvolvida por [3], através do método *SMARTS*, que tem como fundamento a agregação aditiva da utilidade individual dos atributos do objeto em análise, no nosso caso os afundamentos de tensão. O modelo foi aplicado para a ordenação dos pontos monitorados de uma rede elétrica da CELPE e a ordenação obtida possibilita ao decisor a escolha do local para realização de estudos de melhoria da QEE, além de subsidia-lo para definição de políticas globais de melhoria da qualidade do sistema elétrico analisado. Estes resultados correspondem aos objetivos almejados e representam uma contribuição importante para o gestor do sistema de monitoração, sobretudo por transformar os dados dos eventos dos afundamentos de tensão, em informação útil ao gerenciamento da rede elétrica e fornecer diretrizes que podem servir de base à implementação de políticas de melhoria da QEE.

Recomendamos a aplicação do modelo em intervalos regulares de tempo para possibilitar o levantamento da evolução do nível de QEE dos pontos monitorados e salientamos que o método proposto foi aplicado utilizando dados oriundos de um sistema de monitoração de QEE de uma rede elétrica, uma outra possibilidade de aplicação é a sua utilização a partir de dados dos fenômenos elétricos oriundos de simulações digitais da rede elétrica, que forneceriam os ingredientes necessários à aplicação do mesmo.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, A. T. de & COSTA, Ana P. C. S., org. *Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*. Recife, Editora Universitária da UFPE, 2003.
- [2] EDWARDS, Ward. How to Use Multiattribute Utility Measurement for Social Decision Making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-7, 326 - 340, 1977.
- [3] EDWARDS, Ward & BARRON, F. Hutton. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60: 306 - 325, 1994.
- [4] GOMES, Luiz F.; GOMES, Carlos F. S.; ALMEIDA, Adiel T. de. *Tomada de decisão gerencial - Enfoque Multicritério*. São Paulo, Atlas, 2002.
- [5] KEENEY, Ralph L. & RAIFFA, Howard, *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. New York, John Wiley & Sons, 1976.
- [6] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. *Padrões de Desempenho da Rede Básica - Sub-módulo 2.2*. Versão aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica em 24/12/2002, Resolução nº 791/02. Disponível em <http://www.ons.org.br>.
- [7] WORKING GROUP GROUP ON MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY. *IEEE Standard 1159-1995: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. New York, junho de 1995.