



**SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ 01
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA – GCQ**

**MODELO MULTICRITÉRIO PARA ORDENAÇÃO DOS PONTOS MONITORADOS DE UM SISTEMA
ELÉTRICO COM BASE NOS MÉTODOS SMARTS/SMARTER**

Sandro Felinto da Silva *

Adiel Teixeira de Almeida

Companhia Energética de Pernambuco - CELPE

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

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 dos afundamentos de tensão. Tal modelo tem por base a teoria da utilidade multiatributo, mensurada através dos métodos *SMARTS* (*Simple Multi-attribute Rating Technique using Swings*) e *SMARTER* (*Simple Multi-attribute Rating Technique Exploiting Ranks*). 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 de acordo com os respectivos métodos.

PALAVRAS-CHAVE

Afundamento de tensão, Qualidade da energia elétrica, Utilidade Multiatributo, *SMARTS* e *SMARTER*.

1.0 - 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.

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 as metodologias para sua medição, denominadas de *SMARTS* (*Simple Multi-attribute Rating Technique using Swings*) e *SMARTER* (*Simple Multi-attribute Rating Technique Exploiting Ranks*). O sistema de monitoração responsável pelo registro dos eventos não será objeto de análise.

2.0 - 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 (5). 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.

3.0 - 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.

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 por Raiffa, 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. Dentro do contexto dos métodos para medição da utilidade multiatributo serão utilizados os métodos *SMARTS* e *SMARTER*, para o modelo de ordenação proposto.

4.0 - MÉTODOS SMARTS E SMARTER

4.1 Introdução

Os métodos de medição para a utilidade multiatributo *SMARTS* e *SMARTER* foram desenvolvidos por (3), baseados num procedimento de elicitación dos pesos dos atributos. Ambos são derivados 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.

SMARTER usa a ordenação dos pesos dos atributos, em termos de importância, para determinar os seus valores e eliminar o passo de julgamento mais difícil de *SMARTS*, o que facilita bastante a sua aplicação.

Esses métodos possuem 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 os autores chamaram 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 elicitación. Edwards (2), acreditava que os julgamentos de indiferença requeridos por (4), 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 elicitación.

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. *SMARTER* adiciona um terceiro uso que é a justificação da ordenação dos pesos dos atributos para a obtenção dos seus valores conforme é explicado. Descritas as idéias chave presentes nos métodos passaremos a detalhar os procedimentos necessários para sua aplicação.

4.2 Procedimentos para utilização do método SMARTS

O método *SMARTS*, conforme proposto em (3) é empregado através de um procedimento de nove passos, que estão listados a seguir.

Passo 1: *Identificar o propósito da decisão e decisores*. Como primeiro passo deve ser identificado o propósito da elicitación 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 elicitación 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, utilizando-se um dos métodos existentes. 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.

Outra forma de obter a valoração dos pesos das dimensões de valor é 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 .

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

K - número total de atributos.

Este procedimento gera uma lista ordenada das alternativas. Os pressupostos de validade para aplicação da Equação 1 foram testados no passo 6.

4.3 Procedimentos para utilização do método SMARTER

A única diferença na aplicação do método *SMARTER*, em relação ao anterior, consiste na realização do passo 8. O cálculo dos pesos da balança será feito de modo direto, a partir da ordem de importância dos atributos, sem necessidade de elicitação. Para isto, serão utilizados os pesos chamados de *Rank Order Centroid (ROC)*, ou pesos *ROC*, cujos valores correspondem ao centróide da hiper-superfície no espaço dos K atributos, considerando que a soma dos pesos dos atributos deve totalizar um, e atendendo a restrição da respectiva ordem de importância dos atributos. Genericamente, para um número K de atributos, formados considerando que quanto maior seu número indicativo, menor será sua ordem de importância teremos:

$$w_k = (1/K) \sum_{i=k}^K (1/i), \quad (2)$$

onde, w_k é o valor do peso *ROC* do atributo de ordem k .

5.0 - MODELO PROPOSTO

5.1 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 dos métodos *SMARTS* e *SMARTER*.

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*.

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.

5.1.1 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.

5.1.2 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.

5.1.3 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 VTCD, 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.

5.2 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.

5.3 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, conforme a equação,

$$u_{hk}(x_{hk}) = x_{hk} \quad (3)$$

onde: $u_{hk}(x_{hk})$ - utilidade de única dimensão do atributo k , do objeto de avaliação h ;
 x_{hk} - 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, 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.

5.4 Utilidade Multiatributo

O modelo utilizará a agregação aditiva para cálculo da utilidade multiatributo, mensurada pelos métodos *SMARTS* e *SMARTER*, 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.

5.5 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 nas metodologias de mensuração da utilidade multiatributo *SMARTS* e *SMARTER*. A estimativa dos valores dos pesos dos atributos, para uso na metodologia *SMARTS*, 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.

6.0 - ESTUDO DE CASO

O modelo proposto será aplicado para uma rede elétrica do sistema da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), que supre a parte mais industrializada da Região Metropolitana do Recife. Essa rede de 69kV é caracterizada como quase totalmente radial, fornecendo energia a 13 subestações de 69/13,8 kV e a cerca de 11 clientes atendidos diretamente em 69 kV. Os dados dos afundamentos de tensão foram capturados através de

registradores digitais de perturbação instalados em 11 barras dessa rede, sendo 4 no ponto de conexão de clientes e 7 em subestações da CELPE, todos no nível de tensão de 69 kV.

6.1 Aplicação do Método SMARTS

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores obtidos para cada alternativa (barramento com registro dos afundamentos de tensão), por atributo proposto. Tais valores correspondem numericamente as utilidades de única dimensão, uma vez que foi considerada adequada a função identidade para transformação dos valores dos atributos em utilidades de única dimensão, conforme apresentado no item 5.3.

TABELA 1 - Matriz de Valores dos Objetos de Avaliação (Alternativas) por Atributos.

Ponto de Monitoração	Atributos dos Afundamentos de Tensão								
	Quantidade Relativa dos Afundamentos por Fases Afetadas			Duração Relativa dos Afundamentos por Fases Afetadas			Afundamento Médio por Fases Afetadas		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Barra 07	0,2078	0,1538	0,1563	0,2169	0,1255	0,2011	0,0334	0,0625	0,1509
Barra 13	0,1169	0,0462	0,0625	0,0376	0,1174	0,0057	0,0294	0,0798	0,1609
Barra 15	0,1494	0,2000	0,2188	0,2079	0,1673	0,0402	0,0523	0,0862	0,1380
Barra 17	0,1883	0,1846	0,1250	0,2308	0,1552	0,0364	0,0470	0,0753	0,1156
Barra 20	0,0260	0,0462	0,0313	0,0344	0,0121	0,1667	0,0959	0,0606	0,2387
Barra 23	0,0325	0,0462	0,0625	0,0229	0,0702	0,0057	0,0200	0,0768	0,1368
Barra 28	0,0390	0,0308	0,0625	0,0475	0,0634	0,0077	0,0159	0,0756	0,1187
Barra 31	0,0325	0,0462	0,0625	0,0376	0,0540	0,1686	0,0829	0,0993	0,2099
Barra 32	0,0390	0,0769	0,0938	0,0483	0,0688	0,1762	0,0715	0,0837	0,1566
Barra 34	0,0455	0,0769	0,0938	0,0417	0,0864	0,1897	0,0687	0,0631	0,1752
Barra 36	0,1234	0,0923	0,0313	0,0745	0,0796	0,0019	0,0663	0,0811	0,2316

A ordem de importância dos atributos foi elicitada do gestor da área de QEE da CELPE, responsável pela monitoração do sistema elétrico, que neste contexto é o decisor. A partir da ordem obtida, foi elicitado os valores dos pesos de cada atributo, via método de estimativas diretas, pontuados numa escala compreendida entre 0 e 100 pontos, conforme descrito no item 4.2. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos.

TABELA 2 - Valores dos pesos dos atributos, ordenados segundo sua importância.

Atributo	Peso		
	Variável Representativa	Magnitude	Valor Normalizado
Afundamento Médio de Tensão com 3 Fases Afetadas	w_1	100	0,3333
Afundamento Médio de Tensão com 2 Fases Afetadas	w_2	57	0,1900
Afundamento Médio de Tensão com 1 Fase Afetada	w_3	40	0,1333
Duração Relativa dos Afundamentos com 3 Fases Afetadas	w_4	34	0,1133
Duração Relativa dos Afundamentos com 2 Fases Afetadas	w_5	23	0,0767
Duração Relativa dos Afundamentos com 1 Fase Afetada	w_6	17	0,0567
Quantidade Relativa dos Afundamentos com 3 Fases Afetadas	w_7	14	0,0467
Quantidade Relativa dos Afundamentos com 2 Fases Afetadas	w_8	9	0,0300
Quantidade Relativa dos Afundamentos com 1 Fase Afetada	w_9	6	0,0200

Finalmente, os valores das utilidades multiatributo podem ser calculados para cada barramento monitorado através da Equação 1. A Tabela 3 apresenta a ordenação obtida, cujo ponto de monitoração com maior valor da utilidade multiatributo corresponde a barra 31, apresentando-se desta forma, como a barra mais degradada em termos do nível de qualidade referente aos afundamentos de tensão, em relação a QEE ideal, e destacando-se como o ponto mais indicado para a realização dos estudos técnicos de melhoria da QEE.

TABELA 3 - Valores das utilidades multiatributos calculadas através do método SMARTS.

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

6.2 Aplicação do Método SMARTER

Os procedimentos adotados para aplicação do método SMARTER são idênticos aos realizados para o SMARTS, tendo como única diferença a utilização dos pesos ROC, que são calculados conforme a Equação 2. A Tabela 4 mostra os valores das utilidades multiatributo calculados utilizando os pesos ROC, onde pode ser observado que o ponto mais degradado em relação aos afundamentos de tensão também é a barra 31. As ordenações obtidas pela aplicação dos dois métodos, SMARTS e SMARTER, são similares, pois apresentam uma única inversão entre a 4ª e a 5ª barra mais indicada aos estudos técnicos de QEE.

TABELA 4 - Valores das utilidades multiatributos calculadas com os pesos ROC, através do método SMARTER.

Ponto de Monitoração	Barra 31	Barra 20	Barra 07	Barra 15	Barra 36	Barra 34	Barra 32	Barra 17	Barra 13	Barra 23	Barra 28
Utilidade Multiatributo	0,1280	0,1259	0,1241	0,1158	0,1157	0,1152	0,1113	0,1019	0,0891	0,0736	0,0679

7.0 - CONCLUSÃO

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 as variações de tensão de curta duração, dentre as quais merecem destaque 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 diária da rede e dos clientes.

Sendo assim, foi proposto um modelo de ordenação baseado na mensuração da utilidade multiatributo, desenvolvida em (3), através dos métodos SMARTS e SMARTER, que tem como fundamento a agregação aditiva da utilidade individual dos atributos do objeto de análise, no nosso caso os afundamentos de tensão. O modelo foi aplicado para 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 na 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.

8.0 - 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) KEENEY, Ralph L. & RAIFFA, Howard. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. New York, John Wiley & Sons, 1976.
- (5) 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>.
- (6) KEENEY, Ralph L. & RAIFFA, Howard. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. New York, John Wiley & Sons, 1976.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Adiel Teixeira de Almeida

Nascido em Recife, PE.

Doutorado (1994) em Management Engineering: The University Of Birmingham, Inglaterra, Mestrado (1985) em Engenharia de Produção: UFPE e Graduação (1980) em Engenharia Eletrônica: Universidade de Pernambuco.

Empresa: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Professor titular da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Sandro Felinto da Silva

Nascido em Recife, PE, em 09 de maio de 1968.

Mestrado (2006) em Engenharia de Produção: UFPE e Graduação (1991) em Engenharia Elétrica: FESP-UPE.

Empresa: Companhia Energética de Pernambuco - CELPE, desde 1987.

Analista de Planejamento Elétrico da Unidade de Estudos Especiais de Planejamento, do Departamento de Planejamento de Investimentos.