



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

GCE-15
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIV
GRUPO DE ESTUDO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - GCE**

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GLD NO SEGMENTO INDUSTRIAL: PERCEPÇÃO DE CUSTOS E BENEFÍCIOS COMO MECANISMO DE TRANSFORMAÇÃO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA

**Manuel Camela Rafael* Celso Brasil Camargo
Universidade Federal de Santa Catarina
LABPLAN – EEL – CTC**

RESUMO

Novos conceitos e práticas são propostos para a consideração e integração no planejamento e avaliação da demanda de carga e energia de consumidores industriais. Esses conceitos e práticas têm como base a EE e o GLD, partindo-se de uma compreensão clara dos principais custos e benefícios (C&B) e suas fontes nas utilizações-finais industriais. A análise de C&B, além dos de natureza técnico-econômico-financeiros da EE e do GLD, é estendida para contemplarem os ganhos ambientais e sociais. Para tanto, um modelo de Programação Matemática é utilizado objetivando a otimização dos serviços de energia sob um dado conjunto de restrições.

PALAVRAS-CHAVE

GLD; Eficiência Energética, Conservação de Energia, Intensidade Energética, Serviços de Energia, Usos-finais Industriais, Energia, Demanda.

1.0 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Dos vários segmentos das utilizações-finais da energia elétrica, o industrial é o mais significativo com uma participação em torno de 49% do consumo total. Pelo critério simplista da similaridade de cargas as várias classes do segmento podem ser incluídas, direta ou indiretamente, em uma das seguintes grandes áreas e requisitos percebidos durante a produção de serviços de energia: (i) *Grandes Edifícios de Escritórios e Complexos Comerciais*: Seus requisitos percebidos são o provimento de um nível de conforto adequado e a observância de baixos custos operacionais. (ii) *Trabalhos em Metais e Trabalhos em Soldagem*: Priorizam o controle dos custos de manutenção e da energia elétrica. (iii) *Processamento da Borracha e de*

Plásticos: Com uma demanda contínua de operação buscam também uma qualidade sustentável e uma redução de custos. (iv) *Hipermercados*: Realizam seus serviços almejando um nível sustentável de demanda em conforto, boa confiabilidade e redução de custos operacionais. (v) *Parques Temáticos e de Diversão*: Na sua produção de serviços apercebem-se da elevada necessidade de uma boa confiabilidade, qualidade de energia e controle de custos. (vi) *Processamento de Materiais*: Na geração de seus serviços energéticos requerem tempos úteis absolutos, baixos custos e maximização da qualidade de energia. (vii) *Oficinas de Máquinas e Fabricantes de Dispositivos de Iluminação*: Na sua produção de serviços apercebem-se das expressivas pressões para o controle de custos e da qualidade. (viii) *Indústrias de Alta Tecnologia*: Na realização de seus serviços de energia encara a demanda por uma qualidade de energia absoluta bem como pela redução de custos operacionais. (ix) *Lavação Automotivística*: Na produção de seus serviços de energia apercebem-se da sua sensibilidade à confiabilidade, manutenção e custos operacionais. (x) *Campus Universitários e Escolas*: No desenvolvimento de suas atividades observam uma relação com um enfoque de custos de operação e manutenção (O&M) de longo prazo. (xi) *Indústria Logística*: Convive com uma alta competitividade e sensibilidade em relação aos custos operacionais. Em geral, as principais cargas usadas na produção de serviços energéticos dos setores enumerados são as indicadas no Quadro 1. Alguns usos considerados, não são exatamente da classe industrial, porém, a importância, disseminação e similaridade das cargas neles usadas favorece a sua consideração pois as soluções tecnológicas também são similares.

*Rua 25 de dezembro, 75/301 – Tel./Fax: (031) 3849-4707- CEP 35180-004 – Centro/Acesita – Timóteo/MG

*LABPLAN – EEL – CTC – UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

Tel.: +55 48 331 9731 – Fax: +55 48 331-7538, manuel@labplan.ufsc.br, celso@labplan.ufsc.br
Campus Universitário Trindade - Caixa Postal 476 – CEP 88040-900 – Florianópolis – SC – BRASIL

Quadro 1 – Principais Cargas da Produção de Serviços Energéticos no Segmento industrial

Segmento de Atividade	Cargas e/ou Sistemas Predominantes
Grandes Edifícios de Escritórios e Complexos Comerciais	- Ar Condicionado de Grande Porte; - Ar Condicionado de Pequeno Porte; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Acionamentos de Frequência Variável; - Motores Compressores; - Sistemas de Processamento de Dados; - Equipamento de Escritório; - Sistemas Elétricos Complexos; - Painéis Mono e Trifásicos.
Metalurgia e Soldagem	- Máquinas de Solda a Arco; - Máquinas de Solda a Resistência; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Máquinas de Corte a Plasma; - Motores Compressores; - Máquinas Controladas por Computador; - Sistemas Elétricos Complexos; Painéis Mono e Trifásicos.
Processamento de Borracha e de Plásticos	- Motores Extrusores de Acionamentos de Frequência Variável; - Acionamentos Extrusores CC; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Fornos Microondas; - Motores Compressores; - Máquinas Controladas por Computador; - Controles a CLP; - Equipamento de Escritório.
Hipermercados e Supermercados	- Motores Compressores de A/C; - Compressores de Refrigeração; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Terminais Computadores; - Equipamento de Escritório; - Sistemas Elétricos Complexos; - Painéis Mono e Trifásicos.
Parques Temáticos e de Diversão	- Motores Compressores de A/C; - Compressores de Refrigeração; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Terminais Computadores; - Equipamento de Escritório; - Acionamento de Frequência Variável; - Acionamentos de Motores CC; - Fontes de Potência com Tensão Retificada.
Processamento de Materiais:	- Motores AC de Grande Porte; - Motores AC de Pequeno Porte; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Acionamentos de Frequência Variável; - Motores Compressores; - Fontes de Potência com Tensão Modulada por Largura de Pulso; - Controles de Processos por CLP; - Aquecimento por Indução; - Aquecimento por Microondas.
Oficinas de Máquinas e Fabricantes de Pequeno e Médio Porte	- Máquinas de Solda a Arco; - Máquinas de Solda a Resistência; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Máquinas de Corte a Plasma; - Motores Compressores; - Máquinas Controladas por Computador; - Equipamento de Escritório; - Sistemas Elétricos Complexos; - Painéis Mono e Trifásicos.
Indústrias de Tecnologia de Ponta	- Acionamentos de Motores com Dispositivos de Frequência Variável; - Acionamentos de Motores CC; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Retificadores AC/DC; - Motores AC; - Fontes de Potência com Tensão Modulada por Largura de Pulso; - Controles de

	Processo por CLP; - Sistemas de Processamento de Dados; - Robótica CA e CC.
Lavação Automobilística:	- Motobombas Trifásicas; - Motobombas Monofásicas; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Pequenos Dispositivos Eletrônicos; - Unidades de A/C de Pequeno Porte; - Equipamento de Escritório; - Painéis Mono e Trifásicos Mistos; - Sistemas Elétricos Complexos.
Campus Universitários, Colégios e Escolas	- Ar Condicionado de Grande Porte; - Ar Condicionado de Pequeno Porte; - Iluminação Fluorescente; - Iluminação de Descarga de AP; - Acionamentos de Frequência Variável; - Motores Compressores; - Fontes de Potência com Tensão Modulada por Largura de Pulso; - Equipamento de Laboratório; - Sistemas de Processamento de Dados; - Equipamento de Escritório.
Indústria Logística	- Ar Condicionado de Grande Porte; - Ar Condicionado de Pequeno Porte; - Iluminação Fluorescente; - Iluminação de Descarga de AP; - Pequenos Dispositivos Eletrônicos; - Motores CA Trifásicos; - Motores CA Monofásicos; - Refrigeração; - Equipamento de Escritório.

Depreende-se, a partir do Quadro 1, a existência de diversidades significativas nos mecanismos de conversão de energia envolvidos nas diferentes tecnologias finais da produção dos serviços de energia nas utilizações da eletricidade a cargo dos vários consumidores. Depreende-se também que os serviços de energia, por segmento de atuação, cobrem diferentes classes envolvendo, tanto os consumidores que fazem uso das tecnologias de ponta quanto os de tecnologias sofisticadas. O que estas tecnologias têm em comum é o fato de parcelas muito significativas de suas demandas de potência e energia e correspondentes custos se tornarem simplesmente perdidas ou desperdício. A necessidade da solução do problema assim resultante só pode se tornar interessante quando os agentes podem perceber a origem, o peso e o impacto desse ônus. A filosofia prevaiente no planejamento e operação dos subsistemas de geração (G), Transmissão (T), Distribuição (D) e Comercialização (C) da energia elétrica coloca, quase que naturalmente, o consumidor numa posição de observador passivo quanto à sua participação na manipulação à redução de custos de energia em suas utilizações. Em outras palavras, o consumidor carece de uma percepção plena de C&B associados aos ganhos principais resultantes da sua atividade principal geradora de *commodities*. Visando subsidiar a compreensão do problema e estimular a busca de sua solução, também pelos próprios consumidores: na seção 2.0 são discutidas as principais fontes de custos das utilizações da energia, incluindo-se os *custos das externalidades*; na seção 3.0 são apresentados os fundamentos das tecnologias-solução deste problema; na seção 4.0 é proposta uma metodologia de programação matemática (PM) do problema considerando, adicionalmente, as variáveis das externalidades; e na seção 5.0 é apresentado um estudo de caso seguido de uma análise das principais conclusões.

2.0 – PRINCIPAIS CUSTOS E FONTES DE CUSTOS DAS UTILIZAÇÕES-FINAIS DA ENERGIA ELÉTRICA

Os fatores *perdas de potência ou energia* e suas fontes de custos têm sido pouco aprofundados em se tratando, particularmente, das utilizações-finais do consumidor. Estes fatores não são devidamente integrados tanto na etapa de planejamento, quanto de programação até a avaliação e produção de serviços de energia inerentes. Esta situação favorece a circulação predadora, nos sistemas elétricos, de variáveis custosas, porém pouco ou nem tão pouco percebidas, mas remuneradas a um custo alto, tanto frente aos interesses das utilizações privadas quanto aos interesses da sociedade como um todo que, ao fim de contas, arca com a conta da holística dos recursos energéticos primários. Os custos em energia elétrica dividem-se em três categorias diferentes, correspondendo a cada categoria, em geral, a uma diferente fonte custo. Esses três tipos são: (1) Custos de natureza técnica, econômica e financeira; (2) Custos de natureza ambiental; e (3) Custos de natureza social. Nos modelos de planejamento e usos-finais da energia elétrica tradicionais consideram-se apenas os custos de natureza técnica, econômica e financeira. Já nos modelos de planejamento e usos-finais integrados (modelos *PIR*) considera-se, com a mesma prioridade, uma combinação competitiva de custos técnico-econômico-financeiros, de custos ambientais e de custos sociais. Os fundamentos desses custos são: (1) - *custos técnico-econômico-financeiros* - são apenas os custos que advêm de (i) - *Custos de investimentos* na potência instalada nos segmentos de geração própria (unidades geradoras), alimentação (subestações transformadoras), distribuição, circuitos e equipamentos de serviço/utilização. Incluem-se nestes, os custos decorrentes da necessidade de expandir a potência instalada para atender ao crescimento da demanda dos serviços de energia. Normalmente, estes custos de investimentos, na potência instalada, têm impacto como custos fixos do sistema elétrico consumidor e comportam-se como custos marginais de longo prazo dentro do processo de produção da indústria já instalada e em operação. (ii) - *Custos de operação e manutenção* (O&M) nos segmentos de geração própria, alimentação, distribuição, circuitos e equipamentos de utilização. Os custos O&M são predominantemente variáveis e têm impacto na operação da indústria em funcionamento como custos marginais de curto prazo no processo produtivo da indústria. Do ponto de vista de consumidor industrial o custo pelo desperdício de energia elétrica, dada a sua interação com outras variáveis do sistema elétrico, tem impacto sobre os valores da demanda contratada, da energia contratada, da energia consumida, da energia de substituição ou mesmo de gastos financeiros por medidas emergenciais destinadas a reduzir os riscos de déficit no atendimento de energia e de carga durante a produção. Por isso os níveis dessas grandezas, de certo modo, podem expressar a parcela do ônus devido ao desperdício de eletricidade. Desse modo, eles podem ser elementos importantes de medição e monitoração, indicativos do quão pode estar sendo desperdiçado, em energia elétrica, nas instalações e utilizações-finais elétricas de determinado consumidor industrial. No sistema elétrico brasileiro, a

modalidade tarifária disponível para os consumidores industriais, em função de sua classe, taxam-se, sob critérios específicos, a demanda e a energia contratadas e sobretaxam-se as demandas e as energias excedidas e os fatores de potência deficitários a partir de valores normativos prefixados pelo órgão regulador, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (ANEEL, 2000). Para tanto, atualmente, os consumidores industriais, no Brasil, são compulsoriamente enquadrados ou têm a possibilidade de optar por seu enquadramento em uma de três opções tarifárias assim equacionadas (PROCEL/ELETOBRÁS, 2001, ANEEL, 2000): Tarifação Convencional; Tarifação Horó-sazonal Verde; e Tarifação Horó-sazonal Azul. No contexto de busca da otimização de serviços de energia, particularmente enfocando a modalidade tarifária, percebe-se, da análise dessas opções, a existência de oportunidades de economizar energia e custos através da inserção de variáveis da estrutura da inovação tecnológica (MARTINS, 1999; BELZER, 1995) nos modelos de planejamento e utilizações-finais da energia elétrica em consumidores industriais. Grandezas características de sistemas elétricos como o fator de potência e a potência reativa, as perdas joule, as perdas magnéticas, as quedas de tensão, os surtos de tensão, as variações de frequência, as distorções harmônicas e os transitórios eletromagnéticos, constituem variáveis físicas diretas que expressam custos naturais associados com a natureza da eletricidade, porém, susceptíveis a alguma forma de manipulação. Nas utilizações-finais contemporâneas da energia elétrica são cada vez mais crescentes os impactos das tecnologias usadas, sobre algumas dessas características sendo então necessário à adoção de cuidados especiais na engenharia de energia de grandes consumidores. Não fazendo parte deste trabalho a modelagem dessas características, são apresentadas, apenas, elucidaciones fundamentais das origens dessas características e suas interações com os custos e consumo nas utilizações industriais.

Fator de Potência e Potência Reativa - Esse custo pelo baixo fator de potência pesa sobre a exploração da rede elétrica consumidora, de três formas, nomeadamente: (i) *Sobrecarga elétrica inútil do sistema elétrico*; (ii) *Aumento de perdas ativas*; e (iii) - *Aumento do custo da demanda e da energia*. O impacto destes custos deveria merecer uma atenção especial dos planejadores e decisores das indústrias numa perspectiva de *PIR* nos modelos de produção industriais, porque os custos resultantes da energia elétrica podem ser equacionados de modo competitivo nos planos de produção. *Perdas Joule* - As *perdas joule* apesar de serem naturais com o fluxo da intensidade de corrente elétrica, almeja-se a sua minimização nas utilizações-finais da energia elétrica para a produção de serviços de energia desejados. As perdas joule influem desfavoravelmente sobre as utilizações-finais da energia elétrica de consumidores, principalmente através de dois modos, nomeadamente: (i) - *Redução da potência ativa líquida disponível nos pontos da produção de serviços de energia*; (ii) - *Aumento dos níveis de aquecimento dos equipamentos, transformadores, motores, cabos e canalizações elétricas*. Dois efeitos adicionais, colaterais aos dois são a necessidade de reduzir a demanda da produção de serviços de energia e a

redução do tempo de vida útil desses elementos. Refira-se, por exemplo, que um acréscimo de temperatura (ΔT) entre 8 e 10% sobre a temperatura admissível (T_{adm}) de uma dada classe de isolamento de motores elétricos implica, em média, numa redução de sua vida útil em torno de 50% (WEG, 19--).

Perdas Magnéticas - As perdas magnéticas nas utilizações-finais industriais são, basicamente, perdas originadas pela necessidade de energia para a geração de campo magnético de acoplamento entre o vetor de energia elétrica e o serviço de energia. Dentro dos limites normais de tensão e frequência de alimentação e da utilização normal, geralmente as perdas magnéticas podem ser consideradas constantes. Porém, a questão do impacto das perdas magnéticas remete a discussão para o âmbito das tecnologias dos materiais e da construção empregues no fabrico de máquinas e dispositivos elétricos.

Qualidade de energia - A qualidade de energia é uma característica agregada contendo vários elementos, tendo cada um, descrição e comportamento próprios. Alguns dos principais componentes da qualidade de energia, de interesse para com o potencial de conservação de energia, são: (i) as quedas de tensão; (ii) os surtos de tensão; (iii) as variações de frequência; (iv) as correntes harmônicas; e (v) os transitórios eletromagnéticos. As sinergias nos ganhos de economia de energia, no contexto das quedas de tensão, poderão ser obtidas a partir de ações centradas principalmente, em cinco domínios: (i) dimensionamento adequado de circuitos elétricos; (ii) especificação e escolha adequadas de tecnologias de circuitos e canalizações elétricas; (iii) implantações adequadas de tecnologias elétricas; (iv) operação coordenada e criteriosa de tecnologias elétricas; (v) gerenciamento adequado de serviços ancilares associados com as tecnologias de uso-final. A redução ou a eliminação dos surtos de tensão e de seus impactos na produção dos serviços de energia, podem ser obtidos, fundamentalmente através de: (i) implementação de operações de manobra de cargas potentes observando-se aos critérios de coordenação e simultaneidade, sobretudo em manobras de partida e de desligamento dessas cargas; (ii) implementação de mudanças de estados de carregamentos observando-se a critérios de controle e regulação da dissipação das energias dos campos magnéticos e elétricos associados, sobretudo em cargas com funcionamento baseado ou acompanhado pela predominância de histereses capacitivas ou indutivas. A minimização ou eliminação de custos originados por variações da frequência pode ser conseguida simplesmente por um suprimento/fornecimento ao consumidor com a concessionária maximizando os índices de atendimento, ou, nos casos aplicáveis, por um auto-atendimento de cuja geração também se maximizam os índices de qualidade da energia autoproduzida, especificamente no que se refere aos níveis restritivos de variabilidade da frequência da tensão.

Distorções Harmônicas - As tecnologias modernas da produção de serviços de energia têm-se caracterizado, também, por um aumento considerável de equipamentos elétricos não-lineares. Junto a isto, torna-se crescente a necessidade de se reduzirem os custos associados às particularidades operativas desse tipo de cargas. Envolvendo tecnologias de soldagem, robótica, iluminação a arco voltaico, acionamentos de

freqüência variável, acionamentos CC e sistemas CC retificados, as correntes harmônicas geradas têm se tornado a componente mais predominante da demanda elétrica tanto de consumidores industriais quanto de concessionárias de energia. As soluções para esta finalidade reduzem a energia harmônica normalmente demandada por estes equipamentos, proporcionando como vantagens: (i) A extensão da vida útil do equipamento; (ii) O aumento da capacidade elétrica; (iii) A redução da demanda e do consumo de energia; (iv) A ajuda à conformidade aos padrões, normalizações e regulamentações; (v) A redução de problemas resultantes dos harmônicos; (vi) A refrigeração de circuitos e painéis; e (vii) A melhora no fator de potência dos circuitos e da instalação elétrica.

Transitórios Eletromagnéticos - Os transitórios eletromagnéticos além de originarem problemas de estabilidade na operação de dispositivos afins, com possível impacto no atendimento deficitário da carga, aumentam as perdas por efeitos de induções colaterais. As soluções, minimizando os transitórios eletromagnéticos, reduzem o desperdício evitando cortes de carga intempestivos reduzindo perdas e estendendo, indiretamente a vida útil das tecnologias.

Perdas por Efeitos Proximidade e Skin - O efeito proximidade está incorporado em todas as perdas que ocorrem nos condutores de muitas e diversas implementações. Paradoxalmente, seu enfoque em aplicações de engenharia de potência não tem tido a devida abordagem e destaque encarecendo-se, de modo despercebido, as utilizações da energia elétrica. Algumas medidas simples auxiliam a resolver este problema, por exemplo, buscando-se colocar os materiais condutores (terminais, invólucros, blindagens, etc.) distante de campos magnéticos. Se uma blindagem for necessária ela deve ser de superfícies viáveis mínimas possíveis. A busca de utilizações a correntes líquidas reduzidas pode ser o caminho que leve a reduções de perdas por proximidade e correntes parasitas em transformadores e outros equipamentos magnéticos como motores, reatores, e fontes. Apesar do extenso conhecimento sobre perdas, contrariamente, ainda se persiste com cálculos simplificados de perdas em circuitos, baseados em especificações de condutores elétricos e valores de resistência DC pré-estabelecidos desperdiçando-se oportunidades de projetos, potencialmente benéficos em conservação de energia. Dentro de um sistema elétrico, as perdas AC, por efeito proximidade e por *efeito skin*, manifestam-se nas diferentes partes e estruturas do sistema, nomeadamente, nos condutores, nos interruptores, nos eletrodutos e isoladores, nos sistemas de proteção e nos enrolamentos de bobinas de quaisquer dispositivos magnéticos. O efeito proximidade e o efeito skin são as maiores fontes de perdas em transformadores e indutores, bem como em sistemas de distribuição AC constituídos de fios condutores circulares alojados dentro de eletrodutos fechados. As Figuras 1-3 ilustram as distribuições de corrente típicas no efeito skin (Figura 1) e no efeito proximidade, considerando o fluxo da corrente na mesma direção (Figura 2) e em direções opostas (Figura 3).

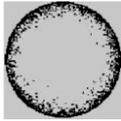


Figura 1 – Distribuições das Correntes no Efeito Skin

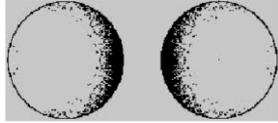


Figura 2 – Distribuições das Correntes no Efeito Proximidade. Mesmo Sentido das Correntes.

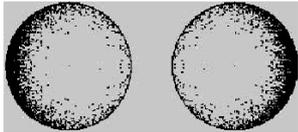


Figura 3 – Distribuições das Correntes no Efeito Proximidade. Correntes Opostas.

Mais sério que o efeito skin, a análise das perdas por efeito proximidade ainda é obscura e matematicamente difícil. Em virtude disto, o efeito proximidade continua sendo uma das áreas mais negligenciadas da análise eletromagnética em projetos de utilizações energéticas. *Correntes Parasitas* - Os efeitos das correntes parasitas não estão limitados apenas aos empreendimentos de freqüências elevadas. Mesmo os condutores não percorridos por corrente elétrica experimentam perdas por correntes parasitas quando expostos em campos magnéticos variáveis externos. Seu impacto no desperdício de energia elétrica decorre da dissipação de parte da potência elétrica nas massas condutoras. Sua minimização ocorre nos domínios da inovação tecnológica e de adequado layout nos edifícios das utilizações. *Custos das Externalidades* – Os custos das externalidades têm tido seu valor aumentado. Significa que seus valores estão sendo progressivamente percebidos pela sociedade. São inúmeros os exemplos da não viabilização de planos de expansão nos segmentos de oferta ou de projetos tecnológicos de grande porte dos segmentos de utilização pela dificuldade desses planos não satisfazerem coerentemente as *restrições de cunho ambiental*. Além desta, outra restrição relevante deste grupo é a *restrição de ordem social*. Os custos das externalidades, para o objetivo que se propõe, podem ser considerados como aqueles para os quais o consumidor total (a sociedade) se apercebe. Seu limite superior, teoricamente seria aquele para o qual ele se predispõe a incorrer e permitir o ressarcimento de seu ônus junto aos consumidores privados identificados. Caracteriza-se assim ser um custo com relativamente grande dificuldade de quantificar. Porém suas fontes podem ser, direta ou indiretamente, identificadas via mecanismos das agências reguladoras. Algumas ponderações, contudo, têm sido utilizadas para estimação aproximadamente os valores técnico-econômico equivalentes dos recursos das externalidades (JANNUZZI, et al., 1997).

3.0 – SOLUÇÕES EM CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A maioria dos custos e fontes de custos discutidos na seção 2.0 sai da abrangência da atuação das concessionárias de energia. Viu-se que a maioria de custos tem como fontes, fenômenos das utilizações da

energia e aspectos de projeto e montagem das instalações elétricas, isto é, são causados no próprio consumidor. Além disso, a maioria desses custos, para muitos padrões de utilização, geralmente não violam as normas e regulamentações específicas. Porém, o que une, no contexto do consumo desperdiçado e das fontes de perdas, a concessionária e o consumidor, é a receita para um e a despesa para outro. Assim, configura-se uma nova necessidade do consumidor buscar, com base na compreensão e iniciativa próprias, avaliações compatíveis que o levem a sentir-se interessado e estimulado a integrar, nas suas utilizações, soluções em energia para um consumo de energia dito limpo. Para tanto alguns dados sobre soluções disponíveis e respectivos níveis de conservação alcançáveis que, ainda que numa constatação simplificada, justificam decisões favoráveis ao uso da EE e GLD por inspiração do consumidor, são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Níveis Prováveis de Economia de Custos e/ou Conservação de Energia (EASI, 2002). ((PP) % com base na potência instalada)

Descrição Fundamental da Solução	Níveis Prováveis de Economia de Custos (EC) ou Conservação de Energia (CE) ou Aumento de Vida Útil (AVU) ou Perda de Potência (PP) (%)
Luminárias novas ou quase novas, associados a controladores de luz ajustados para um nível de economia de 30%.	40% - 89% (AVU). 30% (CE).
Corretores de Iluminação.	20 - 40% ou maior CE
Sistemas de controle ajustáveis para Lâmpadas de descarga de alta pressão.	30% (CE).
Implantes e Sensores de Ocupação.	10% - 20% EC
Controlador de Iluminação Universal para sistemas de descarga de alta pressão, fluorescentes e incandescentes.	25% -40% (CE).
Multi-Produtos Tecnológicos de Eficiência em Iluminação.	não disponível
Supressores de Surto de Tensão e de Tensões Transitórias.	não disponível
Sistemas de Correção de Potência Harmônica para: Acionamentos de Freqüência Variável, Acionamentos CC e Outros Equipamentos CA – CC.	não disponível
Sistemas de Correção de Potência Reativa para Motores, Ar Condicionado e Outros Equipamentos.	não disponível
Centros de Gerenciamento de Sistema Elétricos para Sistemas Elétricos de Distribuição.	não disponível
Perdas por Efeito Proximidade.	1,5% - 3% (PP).
Perdas nos Transformadores.	1% - 2% (PP).
Perdas nas Linhas do Sistema de Distribuição.	1% - 3% (PP).
Perdas por Correntes Parasitas.	1,5% - 4% (PP).
Perdas Totais de Distribuição em Edifícios Industriais (Motores, iluminação, condutores, conexões, painéis, dispositivos de proteção, transformadores, interruptores e	10% a 25% (PP).

Perdas por Histerese.	2% - 5% (PP).
Perdas por Efeito Skin	2% - 8%.
Qualidade de energia.	Exemplo: Um desequilíbrio de 2%, na tensão terminal de um motor trifásico pode aumentar a potência consumida em cerca de 10%.

4.0 – FORMULAÇÃO E MÉTODO DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA

A formulação, respeitante ao problema da conservação de energia, como se viu em seções anteriores, é muito abrangente por envolver vários tipos de serviços de energia, sendo que estes, são igualmente obtidos a partir de diferentes dispositivos elétricos. Por outro lado, o número de indústrias em estudo num determinado espaço geográfico, normalmente, também pode ser elevado, tanto no que se refere ao número de unidades de uma mesma indústria como à diversidade dos tipos de indústria. Neste sentido, depreende-se que o problema é de grande porte e sua formulação contém muitas variáveis conformando um problema de grande dimensão, aonde são necessários métodos adequados para viabilizar a sua resolução.

Admitindo-se algumas simplificações, como: (i) Desagregar dos serviços de energia, as perdas fixas da sua produção; (ii) Desagregar dos serviços de energia, as perdas variáveis da sua produção; (iii) Desagregar dos serviços de energia, as perdas suplementares e outras da sua produção; e (iv) As perdas variáveis da produção de serviços de energia têm um limite ótimo superior, determinado pela operação nominal do dispositivo, e que este limite representa a perda variável da operação da carga em todos os pontos. Obtemos um problema matemático expresso através de uma equação linear com características sugestivas para um tratamento adequado de modo a ser solucionado através de algoritmos de busca de solução, específicos a problemas de *programação linear (PL)*. De modo a viabilizar o tratamento adequando-o aos métodos de solução de problemas de programação linear, torna-se necessário o estabelecimento da *função objetivo (FO)* e das principais restrições. Neste sentido, a função objetivo do modelo visa a minimização dos vetores de energia elétrica necessária ao provimento de níveis adequados de serviços de energia nas mais expressivas utilizações finais de consumidores industriais. As restrições relevantes consideradas neste modelo são: *Restrições de desperdício energético*; *Restrições de disponibilidade*; *Restrições técnico-tecnológicas*; *Restrições de mercado*; *Restrições econômicas*; *Restrições sociais* e; *Restrições ambientais*. A descrição de cada uma destas restrições é apresentada a seguir: (1) *Restrições de desperdício energético* – Este conjunto de restrições visa obrigar o problema a procurar por soluções concordantes com os menores níveis possíveis de desperdícios energéticos em cada uso-final da indústria. Estes níveis são limitados por um valor superior de desperdício energético. (2) *Restrições técnico-tecnológicas* – Este conjunto de restrições tem como finalidade assegurar que a solução do problema envolva aquelas tecnologias de alta Eficiência

Energética já fabricadas e disponíveis no mercado tanto em termos de “kits” quanto em termos de componentes complementares. Estas restrições procuram forçar a disponibilidade e compatibilidade de novas tecnologias frente às tecnologias similares existentes (3) *Restrições de mercado* – O conjunto de restrições de mercado tem como objetivo restringir a solução do problema aos níveis de saturação do mercado por tecnologias de usos-finais eficientes. Estas restrições procuram forçar os aumentos dos níveis de penetração de novas tecnologias com eficiência aumentada, visando incrementar a transformação de mercado. (4) *Restrições econômicas* – Este conjunto de restrições visa assegurar que a solução do problema compreenda tecnologias eficientes de custo efetivo que impliquem, para um horizonte prefixado, numa remuneração atrativa dos investimentos atuais realizados em tecnologias de Eficiência Energética. Estas restrições forçam o alcance de soluções em que os benefícios proporcionados por novas tecnologias de Eficiência Energética sejam maiores que os custos derivados do uso continuado de tecnologias convencionais. (5) *Restrições sociais* – Estas restrições têm como objetivo assegurar que a solução do problema promova a função social das atividades tecnológicas procurando, preferivelmente, não incidir sobre o ser social os critérios para a redução de custos nos negócios. Estas restrições forçam o alcance de soluções que, no mínimo, mantenham o labor humano nas atividades tecnológicas. (6) *Restrições ambientais* – Este conjunto de restrições visa a obtenção de uma solução para o problema, tal que os impactos ambientais (emissões poluentes) associados com as novas tecnologias eficientes sejam menores que os decorrentes do uso continuado de tecnologias convencionais. Estas restrições forçam o alcance de soluções associadas com níveis de emissões poluentes menores que os existentes atualmente. (7) *Restrição de disponibilidade* – Esta é uma restrição cuja finalidade é assegurar que a solução encontrada assegure a produção de serviços de energia necessários com o desempenho adequado dos recursos de capacidade existentes nas instalações industriais. Esta restrição força a obtenção do equilíbrio sistêmico entre vetores energéticos, as energias nos processos de conversão e os serviços de energia. Com estas definições da função objetivo e correspondentes restrições podemos formular matematicamente o problema nos seguintes termos:

1) Função Objetivo;

$$\min \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m [CSEE \cdot VEC]_{ij} \quad \square i, j \square_{EEGLD} \quad (1)$$

sujeito a:

1) Restrições de Desperdício Energético;

$$[VEC]_{ij} \square VEC_{ij}^{supEE} \quad \square i, j \square_{EEGLD} \quad (2)$$

2) Restrições de Disponibilidade Energética;

$$\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m VEC_{ij} \square Cap^{inst} \quad \square i, j \square_{EEGLD} \quad (3)$$

3) Restrições Técnico-Tecnológicas;

$$\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m c_{ij} VEC_{ij} \geq C_{ij}^{t-conv} \quad \square i, j \square_{EEGLD} \quad (4)$$

4) Restrições de Mercado;

$$\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m p_{ij} VEC_{ij} \geq P_{ij} \quad i, j \in \square_{EEGLD} \quad (5)$$

5) Restrições Econômicas;

$$\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m t_{ij} VEC_{ij} \leq T_{ij} \quad i, j \in \square_{EEGLD} \quad (6)$$

6) Restrições Sociais;

$$\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m h_{ij} VEC_{ij} \geq H_{ij} \quad i, j \in \square_{EEGLD} \quad (7)$$

7) Restrições Ambientais.

$$\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m e_{ij} VEC_{ij} \leq E_{ij} \quad i, j \in \square_{EEGLD} \quad (8)$$

Onde:

CSEE = Constante de serviço de energia eficiente;

VEC - Vetor de energia convertido; - VEC_{ij} - Vetor de energia convertido no uso-final j da unidade industrial i ;

- VEC_{ij}^{supEE} = Limite superior eficiente do vetor de energia convertido no uso-final j da unidade industrial i ;

- Cap_{inst}^i = Capacidade instalada na unidade industrial i ;

- c_{ij} = Equivalente de custo unitário da tecnologia eficiente no uso-final j da unidade industrial i ;

- C_{ij}^{tconv} = Equivalente de custo unitário da tecnologia convencional no uso-final j da unidade industrial i ;

- p_{ij} = Equivalente de custo unitário do nível de penetração no mercado da tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;

- P_{ij} = Equivalente do nível de penetração de mercado alcançável (saturação) para a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;

- t_{ij} = Equivalente da taxa de desconto unitária para a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;

- T_{ij} = Nível equivalente do nível da taxa de desconto atrativa para a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;

- h_{ij} = Equivalente de custo social unitário associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;

- H_{ij} = Nível equivalente aceitável (disposição ao custo) do custo social associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;

- e_{ij} = Equivalente de custo ambiental unitário associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;

- E_{ij} = Nível equivalente aceitável (disposição ao custo) do custo ambiental associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;

- i = Contador de unidades industriais;

- j = Contador de usos-finais energéticos; - \square_{EEGLD} = Conjunto Eficiência Energética e GLD.

A obtenção de custos ou de coeficientes equivalentes dos custos, para subsidiar os dados requeridos no teste e validação desta metodologia, exige dados reais de consumidores afins. Na sua ausência uma parte importante dos dados podem ser obtidos a partir do Quadro 2 e outros, determinados através de ponderações com algumas informações de domínio público.

5.0 – ESTUDO DE CASO E COMENTÁRIOS

Uma implementação computacional está sendo simulada com a utilização do modelo proposto, com simplificação de algumas variáveis e restrições. Os

resultados, não estando ainda em estado final, no referente aos seus aspectos quantitativos, limitamo-nos por enquanto, a comentários qualitativos, deixando para a fase final as conclusões consolidadas. A formulação do problema é de grande porte. Observa-se que o modelo é uma extensão de modelos assentes numa visão tradicional dos problemas energéticos. Denotam-se expressivas diferenças na qualidade dos resultados. A metodologia pode-se prestar útil na (re)avaliação dos usos energéticos objetivando investimentos em conservação de energia, pelo consumidor. Ou seja, seus resultados elucidam a percepção do consumidor industrial acerca de custos e benefícios de modo a poder decidir, sob critério, se investe na oferta ou na conservação. A proposta conceitual e metodológica é inovadora por dois motivos principais: (1) modelagem simultânea de variáveis técnico-econômicas com as das externalidades dos usos-finais da energia elétrica almejando-se a equidade e a sustentabilidade, sem perda de competitividade econômica; (2) (re)encaminhamento dos mecanismos de EE e GLD como recursos energéticos manipulados pelo próprio consumidor, endereçando-se assim, importantes subsídios nos esforços complementares para a requerida transformação do mercado de energia.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ELETROBRÁS/PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Manual de Tarificação da Energia Elétrica**. 1ª Edição. Rio de Janeiro RJ, maio, 2001. Disponível: <http://www.fiesp.org.br>
- (2) **Resolução 456 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL**. Estabelece as modalidades tarifárias e fixa os percentuais das tarifas convencional e horo-sazonais. ANEEL. Publicada no Diário Oficial em 29 de novembro de 2000, Brasília DF.
- (3) MARTINS, M^a P. S. **Inovação Tecnológica e Eficiência Energética**. Rio de Janeiro, 1999. Dissertação (MBA em Energia Elétrica) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- (4) BELZER, D. B. **Energy Use and Intensity in the Industrial Sector, 1972 – 1991**. In: AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY EFFICIENT ECONOMY (1995 Summer Study of Energy Efficiency in Industry: august 1-4, 1995 : Grand Island, New York. Disponível: <http://www.etde.org/etdewb>.
- (5) WEG MOTORES LTDA. **Manual de Motores Elétricos WEG**. Catálogo 511.10.0689 PE. 10ª Edição. 19-- , Jaraguá do Sul – SC, Brasil.
- (6) EASI – Energy Automation Systems, Inc. **Increase Profits by Reducing Costs. EASI's Totally Passive Approach**. Disponível em: <http://www.energyautomation.com>; dezembro, 2002.
- (7) JANNUZZI, G. M.; SWISHER, J. N. P. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos. Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis**. Campinas/SP: Editora Autores Associados, 1997