



ESTUDO DE FILMES DE ZnO E FTO PARA JANELAS INTELIGENTES VISANDO O CONFORTO TÉRMICO

Bispo, V.M. ⁽¹⁾; Sabino, M. E. L. ⁽¹⁾; Proença R.T. ⁽²⁾; Diniz, A. S. ⁽³⁾; Branco, J.R.T. ⁽¹⁾

(1) Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - LEMS, Avenida José Cândido da Silveira, 2000 CEP 31170000-Belo Horizonte/MG. tel: 55+(31) 3489 2000 fax: 55+(31) 3489 2200 e-mail: viviane.bispo@pop.com.br, milena_sabino@yahoo.com.br, jose.branco@cetec.br

(2) Universidade Federal de Minas Gerais - CCTN, Av. Antônio Carlos, 6627 Campus UFMG PCA 1 - Anexo Engenharia, Pampulha - Belo Horizonte – MG, CEP: 31.270-90, tel. 31-34996666 fax: 31-3499.6660 e-mail: proença@ufmg.br

(3) Companhia Energética de Minas Gerais S/A- Gerência de Engenharia de Planejamento e Expansão do Sistema de Distribuição. AV. Barbacena, 1200,16 Andar, Ala A2, Santo Agostinho, Belo Horizonte-MG. CEP: 30123970 tel: 55+(31) 3489 2000 fax: 55+(31) 3489 2200 e-mail: asacd@cemig.com.br

RESUMO

O conforto térmico resulta das condições climáticas externas e, portanto, da eficácia das proteções adequadas das edificações. A pesquisa e desenvolvimento de janelas inteligentes vêm contribuir na questão do Conforto Ambiental e Eficiência Energética. Vários estudos sobre dispositivos têm sido realizados visando o conforto térmico e eficiência energética. Em termos da arquitetura, existe a possibilidade da aplicação de certos sistemas contendo óxido de zinco como filme fino condutor. Estes sistemas seriam usados em janelas inteligentes, que regulam a luminosidade e o calor para ambientes fechados, reduzindo assim, o consumo de energia gasta pelas lâmpadas e aparelhos de ar condicionados, possibilitando o aumento no conforto térmico. A associação de indústrias de energia solar nos Estados Unidos, declara que uma janela inteligente (eletrocromica) poderia chegar a causar uma diminuição 50% no gasto de energia num prédio. Isto torna seu uso importante não só para fins estéticos, de conforto térmico mas também para reduzir o gasto de energia. Apresentamos um estudo sobre algumas propriedades que viabilizam a utilização de filmes de óxido de zinco (ZnO) e FTO (óxido de estanho e flúor) em janelas eletrocromicas. Neste trabalho são ressaltadas as características que potencializam as propriedades destes filmes tornando-os materiais de notável excelência para o uso em janelas inteligentes (OLIVEIRA e TORRESI, 1999).

ABSTRACT

The thermal comfort results of the external climatic conditions and, therefore, of the effectiveness of the appropriate protections of the constructions. The research and development of smart windows come to increase Environmental Comfort and Energy Efficiency. Several studies on devices have been accomplished seeking thermal comfort and energy efficiency. In terms of the architecture, there are possibilities of the application of certain systems containing oxide of zinc as thin film conductor. These systems would be used in smart windows, that regulate the brightness and the heat for closed atmospheres, reducing like, the consumption of energy by lamps and air conditioners, making possible the increase in the thermal comfort. The association of solar energy industries in the United States, declares that smart windows (electrochromic) could allow a decrease of 50% in the amount of energy used in a building. This makes their use important not only for aesthetic ends and for thermal comfort but also to reduce the expense of energy. We present a study on some properties that make possible the use of films of ZnO (zinc oxide) and FTO (fluorine doped tin oxide) in electrochromic devices.

The characteristics that potentiate the properties of these films turning them materials of notable excellence for the use in smart windows are emphasized in this work.

1. INTRODUÇÃO

Formas inovadoras, uso racional dos espaços, utilização de novos materiais, domínio do belo. Assim é traduzido o trabalho do arquiteto. Entretanto é necessário que ele utilize materiais diferenciados e que atendam aos desafios tecnológicos. O conforto térmico possui uma importância significativa na matriz energética brasileira, isto devido ao crescimento dos diversos setores da economia que demandam uma exigência energética cada vez maior. Os setores públicos e comerciais têm um intenso uso de aparelhos de ar condicionado. A utilização de janelas inteligentes surge como alternativa ambientalmente correta, minimizando o gasto de energia elétrica na manutenção do conforto térmico.

O equilíbrio entre oferta e demanda de energia é necessário ao desenvolvimento do País. Nesse quadro há um horizonte importante, os recursos energéticos são usados de forma racional e inteligente. O combate ao desperdício de energia e da eficiência de processos que a utilizam é uma ferramenta de competitividade e cidadania a ser oferecido a sociedade.

A instalação de novas usinas geradoras tem causado um problema do ponto de vista ambiental e social. Há que se pensar em formas de diminuir a demanda de energia elétrica sem interferir na economia do País. Algumas alternativas são possíveis como:

- utilização de tecnologias mais eficientes em processos de conversão de energia: força motriz, ar condicionado, iluminação e refrigeração.
- educação para sociedade (programas que visem à educação da população em geral).

A pesquisa de desenvolvimento de filmes finos é relevante na produção das janelas inteligentes. Tais janelas são dispositivos capazes de controlar a luminosidade do ambiente, bem como influenciar na temperatura do ambiente em que o dispositivo ele esteja instalado, reduzindo uso de ventiladores e aparelhos de ar condicionado para refrigeração durante o verão, ou de aquecedores no inverno. O comportamento do vidro frente à radiação solar e suas possíveis repercussões no aquecimento e resfriamento devem ser analisados criteriosamente em um projeto. A radiação solar que entra por uma janela não retornará da mesma forma ao exterior, tornando o ambiente mais aquecido. Uma parte do calor absorvido será reemitido ao exterior da janela em forma de condução.

Uma das características da arquitetura moderna é a utilização de grandes fachadas envidraçadas. Na maioria das vezes, o uso de vidros independente da tipologia climática leva a sobreaquecimentos das edificações devido ao ganho excessivo de carga térmica decorrente da radiação solar. Desse sobreaquecimento, duas conseqüências são imediatas: o desconforto térmico e a intensificação do consumo de energia para o condicionamento artificial. Assim neste trabalho é proposto o estudo de óxidos condutores transparentes, por serem parte integrante da janela inteligente. A utilização de janelas inteligentes surge como alternativa politicamente correta, minimizando o uso de energia elétrica na manutenção do conforto térmico. Sendo assim janelas inteligentes podem eventualmente ter profunda influência em conduzir a uma nova visão de *design*, com janelas e muros com funções reguladoras, fazendo com que o desempenho dos prédios se tornem inteligentes, para estar em concordância com as condições ambientais (GRANQVIST, 1998).

2. JANELAS INTELIGENTES

As janelas inteligentes ou eletrocromicas são dispositivos que representam a aplicação prática do fenômeno chamado eletrocromismo. Por definição eletrocromismo implica em uma mudança reversível de coloração, ocasionada pela aplicação de uma diferença de potencial ou corrente elétrica. Os dispositivos eletrocromicos apresentam a estrutura de sanduíche, composta por filmes finos de óxidos condutores (por exemplo, ZnO e FTO), e uma segunda camada de filme eletrocromico (por exemplo, WO₃ e TiO₂) (GRANQVIST, 1998). Uma janela inteligente deve ser composta por algumas camadas que conferem a esta a propriedade de mudar de cor com aplicação de corrente elétrica. A

parte central é um condutor puramente iônico (eletrólito), usualmente um filme fino ou um material polimérico laminar; que deve ser um bom condutor para pequenos íons tais como Li^+ ou H^+ . O eletrólito fica em contato com uma camada electrocrômica e um contra-eletródo. O último, no caso de um dispositivo transparente, deve exibir electrocromismo de maneira oposta àquela do filme electrocrômico base. Idealmente, o filme electrocrômico (contra-eletródo) pode apresentar um forte electrocromismo catódico ou anódico (AVELLANEDA et al, 2005).

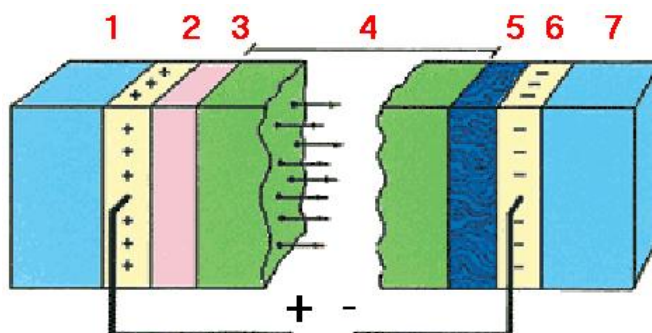


Figura 1- Esquema de janela electrocrômica. 1) vidro. 2) óxido condutor. 3) filme electrocrômico 4) Polímero com metal ou cátions que sairão desta camada para electrocrômica com cargas negativas. 5) Filme electrocrômico com coloração elétrica oposta a anterior. 7) Vidro.

2.1 Coloração da Janela

Os materiais electrocrômicos têm sido extensivamente estudados para uso potencial em painéis de informação, aplicações em automóveis e janelas para controle de intensidade dos raios solares. O electrocromismo (um efeito do estado sólido) e o electroquimicromismo (um efeito electroquímico) estão presentes em um grande número de materiais, como por exemplo, líquidos orgânicos e inorgânicos, além de sólidos (PENNISI et al, 2000).

Tecnologicamente, o efeito cromógeno é persistente mas reversível que ocorre em certos materiais quando estes são submetidos a uma mudança electroquímica. Uma ampla extensão de materiais tem a propriedade de alterar sua cor quando uma tensão é aplicada, ou alternativamente, uma corrente é passada através deles. Esta mudança de cor deverá ser reversível quando a voltagem é removida ou quando a polaridade da tensão ou corrente é invertida. Estes materiais são requeridos pois, por serem frequentemente amorfos e porosos, apresentam condutividade iônica e eletrônica gerando uma rede aberta para rápida difusão iônica. Uma característica comum deste tipo de material, diferentemente dos cristais-líquidos usados em visores é que, uma vez que estes materiais se tornam coloridos, a tensão aplicada pode ser desligada e a cor conservada, tornando o dispositivo electrocrômico (D.E) mais eficiente em energia (YOONG et al, 1989).

A coloração de um material electrocrômico é controlada pela variação do número de cargas elétricas envolvidas na reação electrocrômica. Os vários tipos de materiais ou sistemas electrocrômicos podem ser classificados com base em seu mecanismo de coloração, como sendo de dois tipos: (1) materiais de inserção de íons, os quais são filmes finos que mudam de cor via inserção rápida e reversível de íons e elétrons dentro do material. (2) sistemas de electrodeposição reversível onde, como o próprio nome implica, trata-se de uma mudança de cor efetiva via deposição e dissolução de filmes finos sobre um substrato condutor transparente. Exemplos notáveis destes materiais são os viológenos e a prata. Recentemente, tem havido enorme interesse em dispositivos electrocrômicos electrodeitados reversivelmente especialmente devido a sua alta eficiência de coloração, efeito de memória, rápida cinética de coloração e durabilidade.

Além da capacidade de bloquear a entrada dos raios infravermelhos, estas janelas apresentam uma variação em sua coloração. A variação na coloração vai depender do material electrocrômico escolhido para a fabricação da janela, conhecendo-se vários materiais potencialmente úteis que estão listados na Tabela 1 (TORRESI et al, 2000)

Tabela 1 – Representação das propriedades de Materiais Eletrocromicos

Classificação	Material Eletrocromico	Cores de transição	Eficiência Eletrocromica (cm ² /C)
Coloração Catódica	WO ₃	Transparente/azul escuro	115 (633nm)
	MoO ₃	Transparente/azul escuro	5 (633nm)
	Nb ₂ O ₃	Transparente/azul claro	90 (633nm)
	TiO ₂	Transparente/azul claro	8 (646nm)
Coloração Anódica	NiO	Transp./Marrom escuro	50 (350-500nm)
	IrO ₂	Transparente/preto	15-18 (633nm)
	IRTOF ₂	Transparente/preto	20 (633nm)
Coloração Anódica e Catódica	V ₂ O ₅	Cinza/amarelo	80 (514nm)
	CoOx	Vermelho/azul	30 (633nm)
	Rh ₂ O ₃	Amarelo/Verde	20 (546nm)

A luz se propaga através de ondas eletromagnéticas. O olho humano é sensível à radiação eletromagnética na faixa de 380 a 780 nanômetros, chamada espectro visível, dentro da qual estão localizadas as chamadas sete cores, distinguíveis por seus respectivos comprimentos de onda.

A janela inteligente tem transparência variável. Isto pode ser detectado através de experimento de espectroscopia de UV-visível que fornece a transmitância da janela inteligente. Esta transmitância varia conforme o estado colorido ou estado transparente conforme mostrado na figura 2 (GRANQVIST, 2002). A transmitância na faixa do espectro visível, chega 20% para o estado colorido e 80% aproximadamente no estado descolorido. A dinâmica existente entre o estado colorido e o estado clareado está relacionada a inserção de cargas nos filmes eletrocromicos e podem ser verificadas também por dados voltamétricos (GRANQVIST, 1998).



Figura 2 - Apartamento com janela inteligente (Fonte: Arcoweb)

2.2 Filmes Condutores Transparentes

Óxidos condutores transparentes apresentam, simultaneamente, duas propriedades de interesse científico e tecnológico: transparência óptica na região visível e elevada condutividade elétrica à temperatura ambiente. Tais propriedades viabilizam a utilização dos mesmos como eletrodos transparentes em diversos dispositivos e como sensores a gases. Além de serem ideais para serem utilizados em janelas inteligentes como material condutor de elétrons para o filme eletrocromico, são utilizados em displays finos, *outdoor*, e como dispositivos transparentes de alarme e antenas transparentes para carros. Sendo assim, sua grande viabilidade desperta numerosos estudos visando o entendimento de suas propriedades e o aperfeiçoamento destas para as mais diversas funções (SELLA et al, 1998).

3. CONFORTO TÉRMICO

O Brasil encontra-se dividido em oito Zonas Bioclimáticas. Apesar de sua dimensão e da predominância do clima tropical, a falta de proteção adequada das janelas traz problemas de desconforto local.

O comportamento do vidro frente a radiação solar e suas possíveis repercussões no aquecimento e resfriamento deve ser analisado criteriosamente em um projeto de janela. O vidro pode ser considerado transparente a radiações solares de pequeno comprimento de onda e opaco a radiação de grande comprimento de onda. Portanto, a radiação solar que entra por uma janela não retornará da mesma forma ao exterior, aquecendo o ambiente. Uma parte do calor absorvido será reemitido ao exterior da janela em forma de condução.

4. A DEMANDA DE ENERGIA E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES

O crescimento da demanda de energia elétrica pode ser visto na figura 03, nos diversos setores da economia o consumo de eletricidade é representativo, sendo observado um bom potencial de economia de energia em alguns setores.

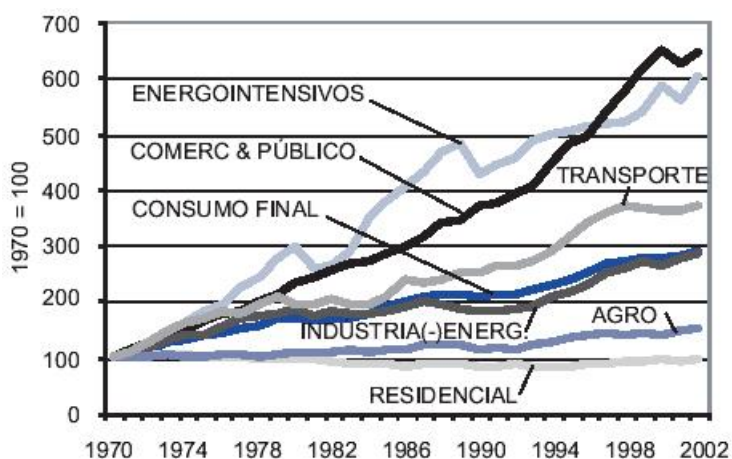


Figura 03 – Consumo Final de Energia – Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN, 2003)

O uso de eletricidade nas edificações comerciais e públicas tem seu principal uso em elevadores, bombas e de forma intensa (aproximadamente 60% da demanda de eletricidade dos setores) em sistemas de iluminação e de condicionamento ambiental (SANTOS, 2002). A utilização de aparelhos de ar condicionado nos setores comercial e público são devido a construção de grandes centros comerciais, ampliação do horário de funcionamento do comércio, crescimento e modernização do setor de serviço.

5. METODOLOGIA

Foram produzidos filmes de ZnO sobre lâminas de vidro a partir da vaporização de zinco por feixe de elétrons e auxílio de plasma de argônio com três níveis distintos de oxigênio, como apresentado na tabela 2, de acordo com processo chamado deposição física de vapor. Neste sistema de deposição, um feixe de elétrons de alta energia (5 a 30 keV), extraído de um anodo é direcionado por um campo magnético, aquece o alvo de zinco, que se evapora e reage com o oxigênio inserido no processo, ocorrendo deposição nas lâminas de ZnO, com assistência de plasma de argônio.

Após o processo de deposição, o filme de ZnO (amostra 2) sobre lâminas de vidro foi submetido à medida de transmitância na região do visível (380-780nm) do espectro eletromagnético. A resistividade elétrica foi medida pelo método de Van Der Pauw, um método que possibilita que as medidas sejam realizadas em amostra de forma arbitrária, cujas espessuras sejam conhecidas. Após

esta primeira caracterização, o filme foi submetido a um tratamento termo-químico realizado em atmosfera controlada de oxigênio, com o objetivo de melhorar sua transmitância e condutividade elétrica.

O conforto térmico é avaliado de acordo com a capacidade do material em bloquear a entrada do infravermelho. Isto pode ser verificado através de técnicas espectroscopia do infravermelho. Tendo realizado este experimento para efeito comparativo de amostras de ZnO (amostra 1) feitas por PVD e amostras já obtidas pelo fabricante *Flexitec Eletrônica Orgânica* composta de óxido de estanho dopado com flúor (FTO).

Tabela 2- Dados referentes aos parâmetros utilizados para deposição física de vapor do filme de ZnO.(Fluxo de Argônio 80,2 cm³/min e fluxo de oxigênio de 148,2 cm³/min)

Amostra	Material de Evaporação	Temperatura do substrato (°C)	Pressão Total (mbar)	Potência do plasma (w)	Tempo de recobrimento (min)
1	ZnO puro	215	4,7. 10 ⁻³	3680	25
2	ZnO puro	235	3,6. 10 ⁻³	3200	25

6. RESULTADOS

Inicialmente foram obtidos filmes finos de ZnO aderentes. Entretanto pouco transparentes como observado na figura 4-a. Após o tratamento termo-químico, além do aumento da transmitância, observou-se na Figura 4-b o efeito de filme fino. Provavelmente, o restabelecimento da estequiometria do óxido de partida, através da incorporação de oxigênio, tornou os filmes mais transparentes.

Através do método de Van der Pauw, a resistividade do filme foi medida antes e após o tratamento em atmosfera oxidante. Houve uma diminuição significativa da resistividade elétrica, de 10,42 para 0,75 ohm.cm, devido ao crescimento dos grãos que constituem o filme fino e oxidação do filme. Sendo assim o filme apresentava grão menores antes do tratamento térmico sendo estes aumentados com o tratamento, aumentando também a condutividade do filme. Os grão menores apresentam mais contornos de grão que dispersam os elétrons tornando o filme um condutor pior de eletricidade.

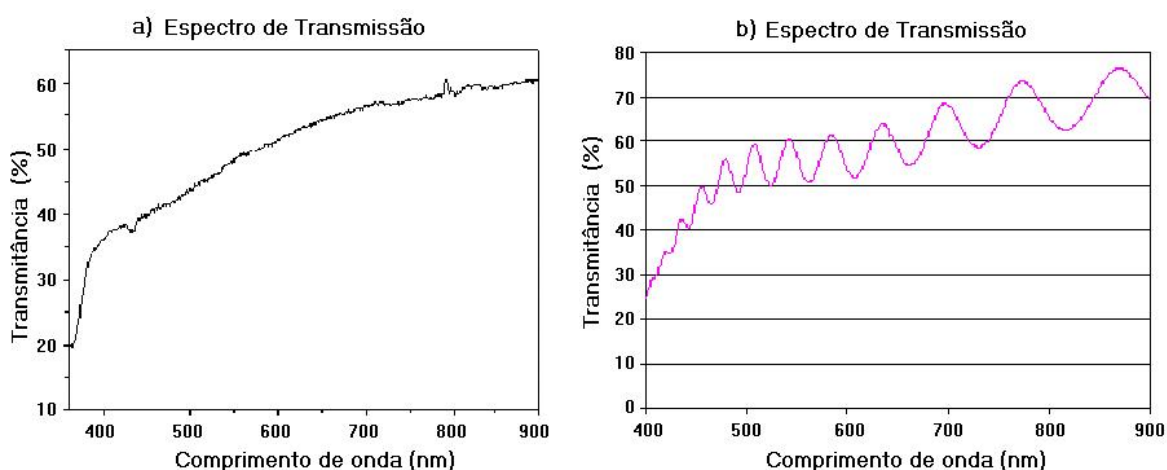


Figura 4 - Representação do espectro de transmissão na região do visível do espectro eletromagnético do filme de ZnO sobre lâmina de vidro (amostra 2). a) filme como depositado, apresentando uma transmitância máxima na região visível de aproximadamente 56%. b) filme após o tratamento termo-químico, apresentando uma máxima transmitância na região do visível de aproximadamente 73%.

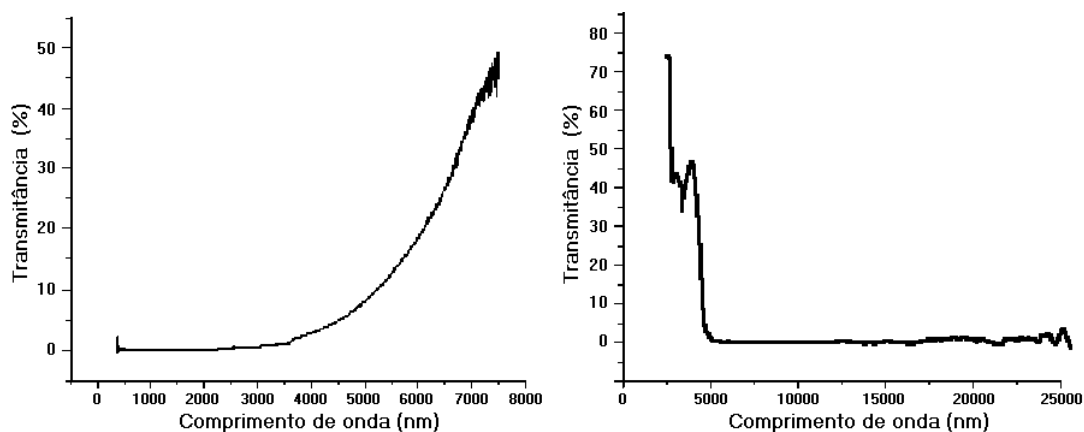


Figura 5 - Representação do espectro de transmissão na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético. a) Filmes de FTO, b) Filmes de ZnO (amostra 1).

A Figura 5 mostra espectros de transmissão na região do infravermelho para filmes de FTO e ZnO. Os espectros mostram que para o filme de FTO a transmitância na região do infravermelho que vai de 1000 5000nm é bem próxima de 0%. Verifica-se então nesta faixa a baixa transmitância. No filme de ZnO sobre vidro observa-se a baixa transmitância em praticamente toda a faixa do infravermelho médio (2500 a 5000nm). Sendo assim, a baixa transmitância na região do infravermelho observada nos filmes, evidencia que estes dois filmes diminuem a transmissão de infravermelho e consequente de calor. Assim ambos os filmes podem ser usados como óxidos condutores transparentes em janelas inteligentes.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existe determinadas propriedades que fazem dos condutores transparentes aplicáveis num grande número de dispositivos. Para janelas inteligentes e para o aumento do conforto térmico através destas é preciso que o condutor transparente que é parte integrante desta janela tenha alta condutividade elétrica combinada com alta transmitância da luz visível. Assim podemos verificar que o filme fino de ZnO (amostra 2) após o tratamento termo-químico apresentou propriedades significativas como alta condutividade elétrica e alta transmitância na região do visível. Além disso, os filmes de FTO e ZnO (amostra 1) mostraram indícios de baixa absorção de calor na região do infravermelho, sendo favoráveis para aplicação em janelas inteligentes. Bons resultados dos filmes de ZnO foram obtidos utilizando a técnica de deposição física de vapor. Neste processo de pesquisa, as amostras estão em processo de análise para uma melhor compreensão das propriedades ópticas e eletrônicas dos filmes de ZnO para aplicação em janelas inteligentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Desempenho Térmico de Edificações, Parte 1:Definições, símbolos e unidades – Projeto 02:135.07-001. Rio de Janeiro, 2003

ARCOWEB, <<http://www.arcoweb.com.br/>>, Acesso em: 08 mar. 2005.

AVELLANEDA, C. O., BULHÕES L.S., and PAWLICKA A., (2005) “The CeO₂-TiO₂-ZrO₂ sol-gel film: a counter-electrode for electrochromic devices”. Thin Solid Films.

GRANQVIST, C.G, AZENS, A., HJELM, KULLMAN, L., NIKLASSON, G.A., RONNOWS, D., MATTSSON M.S., VAIIVARS G. (1998) “Recent Advances in Electrochromics for Smart Windows Applications”. Solar Energy

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional 2003 – Ano base 2002, Brasília

PENNISI, A., SIMONE, F., BARLETTA, G., DI MARCO, G., Lanza, M., “Preliminary test of a large electrochromic window”. *Electrochimica Acta*, (1999).

SANTOS, R.F. (2002). “Arquitetura e eficiência nos usos finais da energia para o conforto ambiental”. São Paulo.

SELLA, C., MAAZA M., NEMRAOUI, O., LAFAIT, J., RENARD, N., SAMPEUR, Y. (1998). “Preparation, characterization and properties of sputtered electrochromic and thermochromic devices”, France.

TORRESI, M.R., OLIVEIRA C.S. (2000) “Uma visão das tendências e perspectivas em eletrocromismo: a busca de novos materiais e desenhos mais simples”. *Química Nova*. São Paulo.

YOONG, G.L. e TULLOCH, G.E. (1989). *Smart Windows- “Major Energy Saving for the Built Environment in the Tropics”*.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), financiadora do projeto e FLEXITEC, que realizou doação de algumas amostras recobertas com FTO.