

EFICIENTIZAÇÃO ENERGÉTICA EM FORNOS DE FUSÃO DE VIDRO ATRAVÉS DE CONTROLADOR FUZZY DE TEMPERATURA

Abstract— The difficulty in temperature control in glass melting furnaces, due to their non-linear characteristics, makes it impossible to implement classical control systems, such as PID (Proportional-Integral-Derivative). This research paper shows the realized implementation of fuzzy temperature controller associated with the use of optical sensor, which uses two wavelengths in temperature measurement. The output temperature of the fuzzy controller is used to adjust the level of gas injected into the glass melting furnace. Results show the energy efficiency obtained with the use of the fuzzy controller, evidencing the fuzzy controller's effectiveness in reducing the consumption of natural gas, maintaining the quality requirements of the produced glass.

Keywords— Glass Melting Furnaces, Energy Efficiency, Fuzzy Controller, Optic Temperature Sensor.

Resumo— A dificuldade no controle de temperatura em fornos de fusão de vidro, devido as suas características não lineares, impossibilita a implantação de sistemas clássicos de controle, como por exemplo PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Este artigo de pesquisa mostra a implementação realizada de controlador fuzzy de temperatura associado com a utilização de sensor ótico, que usa dois comprimentos de onda na medição de temperatura. A temperatura de saída do controlador fuzzy é utilizado no ajuste no nível de gás injetado no forno de fusão de vidro. Resultados mostram a eficiência energética obtida com a utilização do controlador fuzzy evidenciando a eficácia do controlador fuzzy na redução do consumo de gás natural mantendo as exigências de qualidade do vidro produzido.

Palavras-chave— Fornos de Fusão de Vidro, Eficiência Energética, Controlador Fuzzy, Sensor Ótico de Temperatura.

1 Introdução

A dificuldade de controlar a temperatura em fornos de fusão de vidro passa, inicialmente, por encontrar um ponto referencial que represente adequadamente a temperatura da massa vítrea em processo de fusão. Este artigo apresenta a descrição de trabalho desenvolvido em indústria de vidro que teve como objetivos encontrar o adequado ponto referencial de temperatura de controle dentro do forno de fusão, realizar a medição dessa temperatura utilizando sensor ótico baseado em dois comprimentos de onda, e propor uma técnica de controle fuzzy de forma a manter a temperatura do forno em faixas adequadas que resulte em qualidade da produção do vidro e redução no consumo de gás natural.

A temperatura em fornos de fusão de vidro normalmente é controlada de forma manual, isto devido à grande complexidade e não linearidade do processo (Raja, 1975). Este controle, por ser manual, normalmente acarreta em temperaturas que resultam em baixa eficiência energética do processo (Pina, 2003). Esta baixa eficiência energética resulta em consumo adicional de combustível que provoca um maior impacto ambiental com emissão de gases, muitas vezes acima dos padrões internacionais, portanto, a busca de técnicas de controle automáticas de temperatura em fornos de fusão de vidro tem sido perseguida. Ressalta-se que esse controle de temperatura do vidro, pontualmente, não faz sentido pelo fato da distribuição de temperatura não ser homogênea dentro do forno de fusão. Nesta indústria, são mais de quatro toneladas por hora de matéria prima em processo de fusão, deslocando-se no interior da câmara de combustão, em ambiente agressivo, corrosivo e com temperaturas médias ao redor de 1500°C.

Como procedimento na obtenção da temperatura, normalmente realiza-se a medição indireta da temperatura do vidro em ponto específico do refratário da câmara de combustão, buscando garantir condições básicas de instrumentação tais como repetibilidade, precisão e exatidão. Como este ponto encontra-se normalmente submetido às mesmas condições agressivas do vidro, faz-se necessário, a utilização de sensores que não tenham contato com o ambiente interno do forno, como, por exemplo, sensores óticos convencionais, que se utilizam de apenas um comprimento de onda para a captação de energia que retrata a temperatura.

Um dos maiores problemas da utilização do sensor ótico convencional, que utiliza apenas um comprimento de onda está relacionado a sua alta sensibilidade frente a interferências térmicas que afetam a correta resposta de temperatura. A maior delas é gerada pela chama dos queimadores, responsável pela fusão da matéria prima. Assim, a leitura de temperatura ocorre na reversão dos queimadores, que necessariamente apagam-se para que a queima seja trocada de lado. Neste momento, quase toda a energia térmica que representava ruído na leitura da temperatura do refratário é praticamente extinta e o sensor poderá captar a maior parte da energia proveniente da parede, garantido precisão na leitura. Porém, mais um problema se evidencia, pois, o ciclo de reversão completo dura cerca de 40 minutos e, portanto, apenas após este período pode-se obter com a requerida precisão a temperatura na câmara de combustão novamente. Este tempo é suficiente para que um gasto adicional de combustível aconteça de maneira substancial, pois temperaturas baixas, no vidro, prejudicam a qualidade do produto final, justificando a manutenção de elevado consumo de gás. Assim, a correta medição da temperatura revela-se como ponto chave para a criação de qualquer projeto de controle nesta área.

2 Motivação e Objetivo

2.1 Motivação

No processo de fabricação de vidro, o gás natural representa significativa parcela no custo de produção. A redução de gás natural não pode implicar em perda de qualidade do vidro produzido. Este artigo apresenta trabalho em efficientização energética através da utilização de controlador fuzzy realizado em indústria de vidro do estado de São Paulo, Wheaton Brasil Vidros, que possui extração média, nos seus três fornos de fusão, de 300 toneladas de vidro por dia. Ocorrendo para esta produção um consumo de gás natural mensal em torno de 1.500.000 m³. Buscar a redução do consumo de gás natural sem perda de qualidade na produção de vidro foi a motivação deste trabalho.

Qualquer controle que busque efficientizar energeticamente o processo de produção de vidro exige que a medição de temperatura seja realizada - durante todo o processo - com a maior precisão e exatidão possível. Além disso, que essa temperatura represente o mais fielmente possível a temperatura que esteja ocorrendo no processo de produção do vidro como um todo e durante todo o processo de produção. Assim, com esse propósito buscou-se trabalhar com sensor de temperatura mais adequado e na determinação de local mais apropriado, dentro do forno de fusão, isto para que o sensor possa medir a temperatura que retrate o mais fielmente possível o processo de produção de vidro.

Os excelentes resultados obtidos com a implantação do controlador fuzzy - e que estão apresentados neste artigo - motivam, ainda mais, na busca de um controlador fuzzy ainda mais eficiente.

2.2 Objetivo

O objetivo da efficientização energética no processo de fabricação de vidro foi atingir uma economia média mínima de 10% de gás natural, tomando como referência os últimos 24 meses de produção desta indústria. Inicialmente, um dos maiores desafios foi encontrar um ponto que pudesse ser utilizado como referência no controle. Esta referência encontrada foi tal que todos os demais pontos no interior do forno estivessem acima dela, com o objetivo de não prejudicar a qualidade devido à baixa temperatura.

A partir de um estudo realizado pelo Laboratório de Termodinâmica Aplicada, da Universidade de Patras (Panidis, 2001), na Grécia, e apresentado nas Figura 1, pode-se verificar que, de acordo com a distribuição de densidade de fluxo dos gases no interior da câmara de combustão, a região mais fria do forno é oposta aos queimadores. Esta região é a que concentra a menor densidade de vetores fluxo dos produtos de combustão. Assim, qualquer ponto escolhido para a leitura da temperatura do forno, em qualquer ponto desta região citada, é considerado

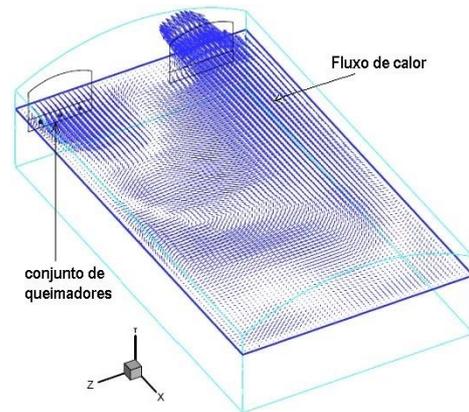


Figura 1. Distribuição dos vetores de velocidade do fluxo dos gases no interior do forno (Panidis, 2001).

mais frio, podendo assumir, portanto, que todos os demais outros pontos estarão em uma temperatura igual ou superior. Esta consideração garante que a qualidade do vidro não será prejudicada por temperatura baixa em outras partes do forno.

Após o estabelecimento da região apropriada do forno para a instalação do medidor de temperatura foi escolhido com ponto referencial de medição de temperatura indireta do vidro, a parede de sombra, que fica oposta a um dos conjuntos de queimadores. Porém, o fato de se aguardar pelo menos 40 minutos para se realizar a medição da temperatura do refratário, torna o sistema pouco eficaz, por conta da lentidão nas ações de controle no nível do gás injetado na câmara. Assim, foi determinante para o sucesso deste trabalho a utilização de um sistema de medição capaz de aferir mais de um comprimento de onda, característica disponível no dispositivo sensor ótico de temperatura com dois comprimentos de onda.



Figura 2. Sensor ótico instalado em um forno de fusão de vidro.

A Figura 2 apresenta foto da montagem em campo do sensor ótico bicolor, apontando para a parede de sombra no interior do forno de fusão de vidro, através de um dos orifícios no lado oposto do conjunto de queimadores.

A Figura 3 apresenta foto do sensor em operação no campo, realizando a leitura da temperatura do refratário. Esta medição sofreria significativa interferência na leitura pelos queimadores se o sensor fosse baseado na radiação infravermelha e, por este motivo, a medição é realizada com sensor bicolor que filtra a radiação e com isso, o sinal representa apenas a informação do local em observação.



Figura 3. Sensor ótico bicolor em operação

O sinal da temperatura é enviado para o sistema de controle microprocessado, através de um transdutor ótico/elétrico, com uma escala de 4 a 20 mA de corrente contínua, equivalente a 932 a 3.632°F, respectivamente.

3 Controlador Fuzzy

3.1 Estimador Fuzzy

As aplicações de lógica fuzzy em controle, basicamente, seguem duas vertentes: Mamdani e Takagi-Sugeno (Arulmozhi K., 2012). Um conjunto fuzzy é determinado por uma função característica, também chamada de função de pertinência, tal que: $\mu_A:U \rightarrow [0,1]$, ou seja, uma função mapeada por $\mu_A(x)$, que representa o grau de pertinência de x em A , no intervalo $[0,1]$, representando um universo estabelecido.

A ideia central para a previsão da temperatura na parede de sombra foi desenvolver um sistema de suporte a decisão, baseado em lógica fuzzy, utilizando o método de inferência de Mamdani de forma a obter a temperatura ideal para uma maior eficiência do processo.

Uma das dificuldades em controlar a temperatura em fornos de fusão de vidro está nas grandes variações de extração (Dequan S., 2012) em um mesmo dia de produção. Assim, manter a temperatura do forno elevada é procedimento normal, evitando trazer matéria prima não fundida para os canais de conformação. Porém, a elevação da temperatura, sem um devido controle, elava o custo da fabricação de vidro, dado que o gás natural utilizado é um dos principais insumos para a produção.

Uma das regras de controle, utilizada no sistema de inferência fuzzy, deve contemplar as diferentes extrações que variam no tempo, as quais alteram o *setpoint* de temperatura do forno de fusão para evitar a perda de qualidade no vidro. Este controle do *setpoint* está vinculado à restrição do tempo mínimo de permanência (tempo de residência) da matéria prima injetada na câmara. Assim, o desafio de produzir com qualidade e menor consumo de gás possível indica o controle em lógica fuzzy que utiliza os conhecimentos técnicos e operacionais acumulados em anos de experiência. A dificuldade na instalação dos softwares de controle, devido a necessidade de parada do equipamento, fez com que fosse necessário um simulador, onde os resultados reais pudessem ser comparados (Ungan, A., 1987). Estes resultados reais foram conseguidos através de uma operação manual do forno de fusão. O acompanhamento manual da operação foi realizado através de uma planilha de processo que contém uma “radiografia”, ou seja, evidencia as principais informações de produção. Nela encontram-se dados de temperatura, volume de extração (quantidade de vidro produzido por hora), enforma (volume do carregamento da matéria prima por hora), umidade, pressão, velocidade dos inversores de frequência, vazão de ar e vazão de gás natural.

A Figura 4 apresenta diagrama com as variáveis de entrada e saída do controlador fuzzy. A temperatura estabelecida representa o ponto de máxima eficiência energética, considerando a extração do forno e a vazão de gás. A partir da temperatura do sensor ótico é ajustado a vazão do gás (aumentando ou diminuindo) de forma que a vazão de gás passe a ocorrer em um novo ponto de operação.

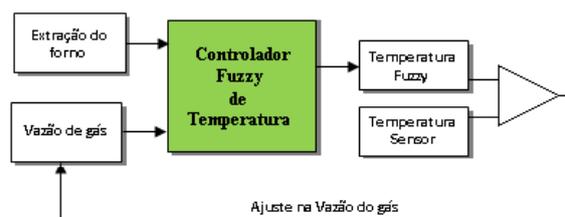


Figura 4. Diagrama com as variáveis de entrada e saída do controlador Fuzzy

3.1 Construção do Controlador Fuzzy

A Simulação foi realizada através do software MATLAB®, versão R2013_a(8.1.0.604), SIMULINK® versão 8.1 (R2013_a) e “Fuzzy Logic Toolbox”. As entradas de extração e vazão de gás foram simuladas utilizando uma função degrau. A saída do sistema foi monitorada através de um “Scope”. O processamento das informações de entrada foi realizado através de um “Function Block Parameters”, o qual contém o endereçamento do arquivo gerado pelo software FIS Editor (*Fuzzy Inference System Editor*), que é o editor com programação de alto nível do sistema de inferência fuzzy do MATLAB®. Isto permite representar entradas e saídas, métodos de fusificação e defusificação, geração das regras e superfícies de soluções. O estimador de temperatura da parede de sombra, tem como entradas a extração de matéria prima derretida e a vazão de gás.

A Fig. 5 mostra a tela do “FIS Editor”

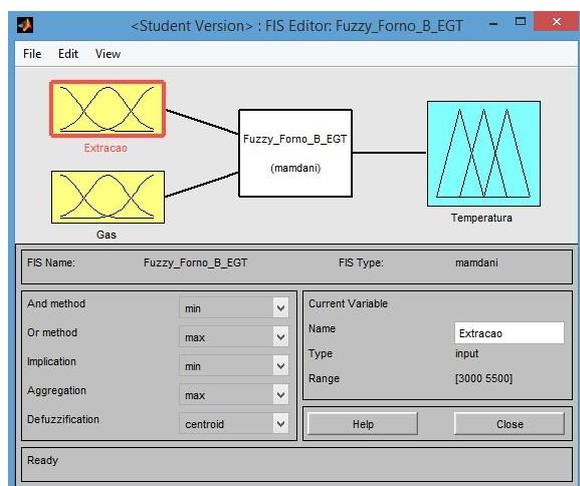


Figura 5. Tela do editor do sistema de inferência fuzzy (FIS Editor)

O próximo passo foi a criação das funções de pertinência para as variáveis de entrada do controlador fuzzy, baseada em regras específicas do processo. Foram criadas 25 regras que governam a dinâmica do controle pelo modelo de Mamdani. Estas regras foram estudadas e estabelecidas através dos relatórios com os dados reais obtidos em campo, tudo com o objetivo de eficientizar energeticamente o processo, sem a perda da qualidade da produção. Assim, as experiências fabris nortearam a adequada formulação dos intervalos das funções membros e regras de inferência, estabelecendo as saídas apropriadas do controlador.

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam as faixas de variação das variáveis de entrada e saída do sistema de controle fuzzy.

Tabela 1. Variável de entrada - Extração.

Faixas de variação da variável de entrada extração		
Variável	Definição da Variável	Faixa (kg)
E1	Extração muito baixa	3.200 a 3.507
E2	Extração baixa	3.353 a 3.753
E3	Extração média	3.559 a 4.099
E4	Extração alta	3.950 a 4.450
E5	Extração muito alta	4.300 a 4.800

Tabela 2. Variável de entrada – Gás Natural.

Faixas de variação da variável de entrada gás natural		
Variável	Definição da Variável	Faixa (m ³ /h)
G1	Vazão muito baixa	570 a 620
G2	Vazão baixa	590 a 640
G3	Vazão média	640 a 670
G4	Vazão alta	650 a 710
G5	Vazão muito alta	690 a 720

Tabela 3. Variável de Saída – Temperatura.

Faixas de variação da variável de saída temperatura		
Variável	Definição da Variável	Faixa (°F)
T1	Temperatura muito baixa	2.820 a 2.825
T2	Temperatura baixa	2.823 a 2.831
T3	Temperatura abaixo da média	2.825 a 2.833
T4	Temperatura média	2.831 a 2.845
T5	Temperatura acima da média	2.841 a 2.851

O conjunto de regras elaborado com as variáveis do sistema fuzzy está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Regras do controlador fuzzy.

		EXTRAÇÕES				
		E1	E2	E3	E4	E5
VAZÕES DE GÁS	G1	T2	T2	T1	T1	T1
	G2	T3	T3	T2	T1	T1
	G3	T4	T4	T4	T3	T2
	G4	T5	T6	T5	T4	T4
	G5	T6	T7	T6	T5	T5

Através deste conjunto de regras, foi possível gerar o espaço de soluções para a estimação da temperatura do sensor, a partir das possíveis entradas do sistema.

Verifica-se, na Figura 6, que se trata de um sistema não linear, como já havia sido previsto.

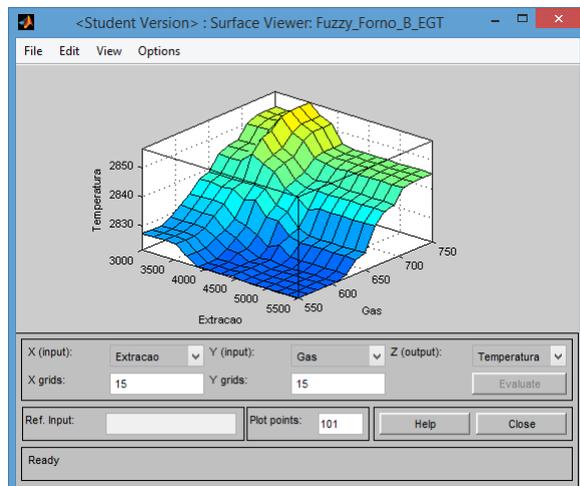


Figura 6. Espaço de soluções Controlador Fuzzy

A estrutura do diagrama de blocos em SIMULINK[®] é apresentada na Fig. 7. O simulador, através das informações reais de extração e vazão de gás natural, estima a temperatura da parede de sombra do forno, aproximadamente 10 minutos antes dela estabilizar em patamares elevados, informando ao operador a necessidade de reduzir o consumo de gás natural, dispendioso. Da mesma maneira, o simulador através das mesmas informações de campo, evita que a temperatura se estabilize em patamares abaixo do que se considera ideal para manter os padrões de qualidade do vidro fundido.

As informações do controlador fuzzy são enviadas a um sistema supervisor e visualizadas por operadores treinados, que as utilizam para interagir com o sistema.

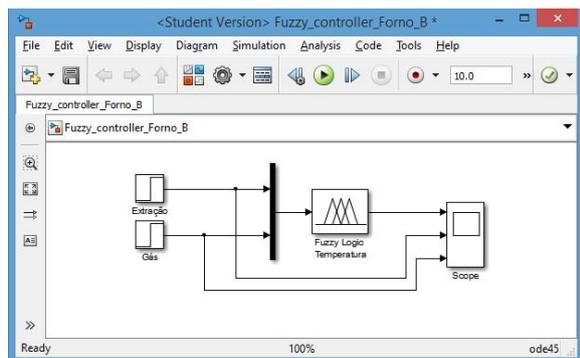


Figura 7. Sistema fuzzy para o estabelecimento das temperaturas

4 Resultados Obtidos

Foi realizada a instalação de um sensor ótico que capta a informação da temperatura em um ponto específico do refratário, a “parede de sombra”, oposto aos queimadores do forno. A leitura da temperatura é realizada em dois comprimentos de onda, sendo possível, assim, filtrar as radiações espúrias que causavam o ruído indesejável na medição. Este sinal de temperatura “confiável” serviu como referência para identificar, com relativa antecedência, o momento em que a curva de temperatura do forno está estabilizada.

Através da análise dos dados obtidos em campo e com o simulador criado em MATLAB[®], verificou-se que quase a totalidade das extrações do forno exigiam um *setpoint* de temperatura máximo de 2.840°F, ou seja, indicava já uma redução em torno de 10°F. Esta informação foi bastante útil, e estabelecia uma nova condição operacional.

A curva típica de temperatura (em °F) para forno de fusão de vidro, antes das intervenções do controlador fuzzy proposto, é mostrada na Fig. 8. Neste gráfico, o início da região de controle indica o momento em que toda a energia, que foi levada pelo ar de combustão no interior do forno após o desligamento dos queimadores, é entregue ao refratário. No instante final desta região, antes da próxima reversão, a temperatura medida pelo sensor atinge o seu pico máximo, sendo, portanto, comparada com o *setpoint* padrão para aquela extração. Neste instante, ocorre o reposicionamento da válvula de gás para atender aos requisitos de eficiência energética.

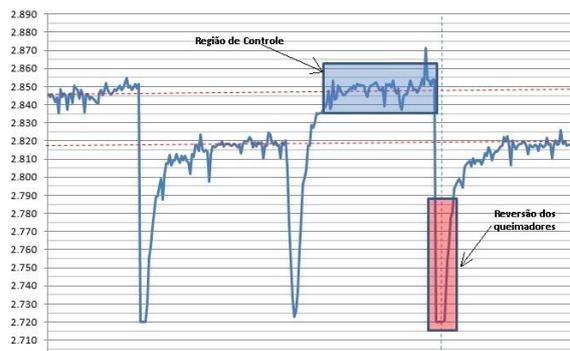


Figura 8. Curva de temperatura antes da implantação do controle fuzzy proposto

Com a instalação do sistema de eficiência energética utilizando o controlador fuzzy de temperatura associado ao sensor ótico bicolor pode-se obter uma economia média de aproximadamente 8 % em gás natural (com picos de redução de cerca de 9,8%). Isto ocorrendo sem prejuízos dos índices de qualidade de produção do vidro estabelecidos pela indústria. A Fig. 9 apresenta a evolução deste índice de eficiência energética após a instalação (ocorrida no mês 11) do controlador fuzzy de temperatura.

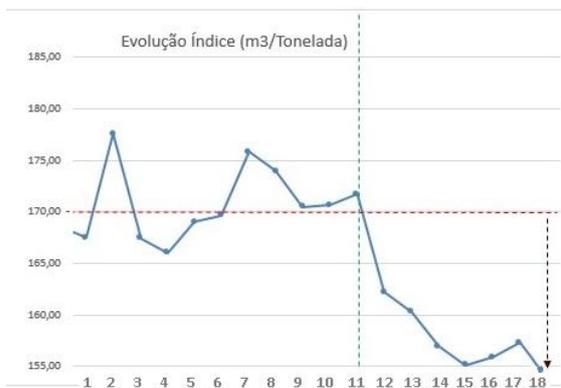


Figura 7. Evolução (mês a mês) da vazão do gás natural antes e depois da instalação do controlador fuzzy de temperatura.

4 Conclusão

O controle fuzzy projetado juntamente com a utilização do sensor ótico de dois comprimentos de onda possibilitou uma maior eficiência energética no processo de produção de vidro nesta indústria. Refinamentos na base de dados do controlador serão buscados e regras mais precisas de controle fuzzy poderão ser utilizadas.

A partir do sucesso alcançado na eficientização deste forno de fusão de vidro a indústria pretende realizar a eficientização nos seus outros dois fornos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Wheaton Brasil Vidros pelo uso dos seus dados para a elaboração deste artigo.

Referências Bibliográficas

- Arulmozhi K. Tand Sheelarani R, 2012. Prediction of ultrasonic velocities in ternary oxide glasses using microstruc. properties of the constituents as predictor variables; ANN approach.
- Dequan S. and Peng X, 2012. Application of Expert Fuzzy PID Method for Temperature Control of Heating Furnace. *Procedia Engineering*, vol. 29 2012. p. 257-261.
- Panidis, Th. and Perrakis, 2001, Computational investigation of combustion schemes for glass furnaces, First National Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering, ASME International, Paper ANG1/P130, pp. 1-6.
- Pina, J. and PU Lima, 2003. A glass furnace operation system using fuzzy modelling and genetic algorithms for performance optimisation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 16 (2003): 681-690.
- Raja Rao B. V, 1975. A survey of automatic control in the glass industry. *Automatica*, 11(1):37-52.
- Ungan, A and Viskanta R, 1987. Three-dimensional numerical modeling of circulation and heat Transfer in a glass-melting tank: *Glastechnische Berichte* 60(3), 71- 78.