

SISTEMA DE AQUECIMENTO AUXILIAR RESISTIVO EM REATOR PARA PROCESSAMENTO DE MATERIAIS POR PLASMA

Luciano Antonio Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná

CCET – Engenharia de Controle e Automação

Rua Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho - Curitiba - PR - CEP 80215-901

Tel: (41) 271-1333

lmendes@rla01.pucpr.br

Davi Fusão

Aloísio Nelmo Klein

Jeol Louis René Muzart

Paulo Pereira Wendhausen

Universidade Federal de Santa Catarina

Campus Universitário, Trindade – Florianópolis – SC – CEP 88040-900

CTC – Engenharia de Materiais

Campus Universitário, Trindade

davi@pg.materiais.ufsc.br; klein@materiais.ufsc.br; muzart@materiais.ufsc.br;

wendhausen@materiais.ufsc.br

Nilton Francisco de Oliveira da Silva

CEBRA – Conversores Estáticos Brasileiros Ltda.

Rua Lauro Linhares, 589 – Trindade – Florianópolis – SC – CEP 88036-002

nilton@cebra.com.br

***Resumo:** Apresenta-se neste artigo a arquitetura de aquecimento auxiliar resistivo implementada em um reator para processamento de materiais por plasma, contendo três zonas independentes de controle de temperatura. O reator de plasma pouco ionizado sobre o qual foi desenvolvido este projeto permite a execução de processos como nitretação de componentes mecânicos e extração de ligantes, seguida de sinterização, de componentes moldados por injeção. Em um processo por plasma, controla-se a pressão, composição e renovação da mistura gasosa em médio vácuo, e a energia transferida às partículas do plasma. O acréscimo do sistema de aquecimento auxiliar tem por objetivo um campo de temperaturas com gradiente mínimo ao longo da carga, e a dissociação entre a intensidade do plasma e a temperatura de processamento. Devido às altas temperaturas atingidas, acima de 1300°C na etapa de sinterização, o reator é dotado internamente de um grupo de blindagens de radiação de molibdênio e aço inoxidável, sendo o conjunto de resistores de molibdênio montado no perímetro interno deste grupo. Resistores de molibdênio apresentam uma relação resistência/temperatura de elevado caráter não-linear, de forma que um algoritmo de controle de temperatura deve considerar essa não-linearidade para computar adequadamente a potência administrada a cada momento. Tal algoritmo foi implementado em um CLP programável em linguagem descritiva, com set-point de*

temperatura enviado remotamente por um sistema computacional de controle, supervisão, registro e programação do reator de plasma baseado na plataforma LabVIEW[®]. Resultados de testes de funcionamento são apresentados, indicando um desempenho satisfatório do sistema para a finalidade proposta.

Palavras-chave: Aquecimento auxiliar resistivo; Controle de temperatura; Reator de plasma.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de plasma pouco ionizado na produção de componentes mecânicos, incluindo aplicações como a nitretação por plasma e as etapas de extração de ligantes e sinterização de componentes moldados por injeção, pode atender a requisitos de ordem técnica, econômica e ambiental nestes processos de forma competitiva, o que tem encorajado esforços e investimentos no desenvolvimento dos equipamentos industriais necessários.

A base teórica referente aos princípios físicos que permitem a formação do plasma e a interação plasma-material em processamento está descrita em profundidade em Chapman⁽¹⁾. O emprego em processos de tratamento superficial, como na nitretação, evoluiu em meio a trabalhos sobre a melhor configuração com relação à forma de alimentação de energia, isolamento/homogeneização térmica, inibição de arcos e parâmetros de plasma visando à obtenção no substrato (superfície do material em tratamento) de morfologias de camada nitretada adequadas para resistência ao desgaste e à oxidação⁽²⁾. De uma forma geral, as melhores práticas de projeto de reatores de plasma foram resguardadas por uma incipiente indústria, de forma que significativa parte da escassa literatura disponível a respeito está em anais de congressos específicos. Em um momento anterior, a ausência de aquecimento resistivo auxiliar nos equipamentos era defendida com os argumentos de que a volatilização de substâncias a partir das resistências eventualmente poderia contaminar os componentes em tratamento, e que se incorreria em dispêndio desnecessário de energia. Posteriormente, verificou-se que homogeneizar a temperatura da carga com um sistema de aquecimento auxiliar, compensando o aquecimento não homogêneo que ocorre quando aplica-se plasma somente e trazendo a carga à temperatura ideal de processamento em tempo muito menor, facilitaria bastante a operação dos reatores⁽³⁾, e que em pressões e fluxos de renovação da atmosfera apropriadamente escolhidos a contaminação advinda das resistências de aquecimento seria irrelevante.

A aplicação mais recentemente encontrada está em etapas da tecnologia de *Powder Injection Moulding* (PIM), especificamente na remoção do ligante que viabiliza a injeção de pós metálicos em matriz fechada e na subsequente sinterização, em ciclo único, num mesmo equipamento^(4,5). Como pode-se evitar os tempos de espera de resfriamento do forno de remoção de ligante e de reaquecimento da carga no de sinterização, há um ganho econômico intrínseco elevado. Insumos (gás) e energia necessários também são significativamente reduzidos⁽⁶⁾. A remoção do ligante é obtida eficazmente pela quebra de moléculas orgânicas com cadeias de alto peso molecular em cadeias menores, voláteis, que são então removidas pelo sistema de bombeamento de vácuo. Experimentos demonstraram que, na ausência do plasma, ocorre a condensação de grande quantidade de material orgânico nas partes frias do equipamento. A separação da potência de plasma da potência de aquecimento, por zonas, permitiu um controle superior do processo. O controle de temperatura unicamente pelo plasma fica muito prejudicado pela incidência elevada de arcos elétricos durante o tratamento, já que impurezas no suporte e nos componentes são liberadas durante o aquecimento, desviando a descarga elétrica do chamado regime anormal (*abnormal glow discharge*) para o de arco (*arc discharge*). O apoio do aquecimento auxiliar permite o uso de potências menores de plasma, em níveis adequados para a quebra de moléculas orgânicas pesadas ou a realização de um tratamento termoquímico, e também suficientemente baixas para diminuir satisfatoriamente a incidência de arcos. A contra-medida possível para conter o fenômeno ‘*arcing*’ é a redução da potência de plasma, até a cessação completa dos arcos,

para uma retomada logo a seguir. Este processo pode até mesmo ser automatizado, mas, devido a ausência temporária de transferência de energia aos componentes, paga-se o preço de quedas indesejadas na temperatura, principalmente em etapas do processamento realizadas em altas temperaturas (por exemplo, a sinterização). Torna-se assim muito difícil automatizar um ciclo de processamento quando é necessário enfrentar sessões insistentes de arcos, já que as incursões da temperatura por fora da trajetória programada fazem com que o tempo de processamento total seja bastante variável – um empecilho sério para a operacionalização de um sistema de produção regular.

2. REATOR DE PLASMA POUCO IONIZADO

O reator de plasma usado neste desenvolvimento apresenta três unidades funcionais principais: processamento, controle e provisão de gás/energia/vácuo. O processamento é determinado pela trajetória no tempo de valores dos parâmetros seguintes: pressão, temperatura, fluxo/composição da mistura gasosa, tensão e corrente no circuito de alimentação – tipicamente uma onda quadrada em corrente contínua com período da ordem de dezenas de microssegundos e amplitude de centenas de volts. Estes parâmetros e outros lógicos necessários para o funcionamento do sistema com segurança são gerenciados em um computador, no qual um software especial embute as funções de controle, programação, monitoramento e registro do processo, sendo que um relatório pode ser rapidamente emitido ao final do ciclo de processamento. Este software (SisReat) está implementado em linguagem LabVIEW.

A câmara de vácuo que provê a contenção do processo é projetada com parede dupla, a fim de atender às necessidades de refrigeração e proteger as entradas vedadas da câmara. O suporte de componentes deve ser projetado em materiais resistentes às altas temperaturas e de fácil movimentação, já que o processamento é feito em bateladas. Para maior eficiência, um conjunto de blindagens (superfícies) de radiação, também em materiais refratários, é adaptado no entorno da carga, minimizando perdas de calor e diminuindo a potência necessária para sustentar a temperatura necessária nas etapas de pré-sinterização e sinterização.

A pressão no interior da câmara é controlada em malha fechada por uma unidade dedicada, sendo que uma servo-válvula entre a câmara e a bomba de vácuo (*downstream closed-loop control*) permite agir sobre o fluxo gasoso total que atravessa o ambiente de processamento. O sistema opera em uma faixa de 0,01 a 100Torr, e admite misturas de gases como H₂, O₂, N₂, Ar e CH₄. A mistura de gases é feita com o uso de um número adequado de controladores de fluxo de massa. Eventualmente, um analisador de gases residuais pode ser acoplado em uma tomada junto à exaustão de gases na saída da câmara, para que informações sobre o andamento do processamento sejam aproveitadas em ações de realimentação no próprio ciclo ou armazenadas para posterior análise. Este recurso permitiria, por exemplo, monitorar a extração de ligante com base na incidência de substâncias orgânicas no analisador, bem como manter controle sobre a pressão parcial de substâncias oxidantes, realimentando o fluxo para uma diluição suficiente das mesmas.

O monitoramento da temperatura em pontos de interesse no suporte de processamento é feito com termopares embainhados em cerâmica e inonel. O sinal dos termopares é condicionado com isolamento óptico, já que estão sujeitos ao contato acidental com a alta tensão no cátodo do sistema. Com o uso do aquecimento auxiliar, os termopares devem ser apropriadamente posicionados nos pontos de controle nas zonas (no suporte de componentes carregado) para que se alcance a homogeneização de temperaturas. Os sensores de temperatura são usados aos pares, de forma que na falha de algum termopar o respectivo redundante continua a prover a informação ao controle.

O controle da temperatura pode ser feito através da potência de plasma (com os inconvenientes descritos na seção anterior) tomando-se o *duty-cycle* da fonte de alimentação de energia como variável controlada. O algoritmo de controle inclui uma estratégia de moderação do comportamento do *duty-cycle* em função da taxa momentânea de incidência de arcos. Verificou-se que esta forma de controle

pode ser útil no início da etapa de extração, onde a energia fornecida apenas pelo plasma pode ser suficiente para conduzir a temperatura ao longo da rampa programada.

Os ciclos de processamento envolvendo a sinterização de componentes moldados por injeção requerem que o reator opere com segurança em temperaturas de até 1370°C (sinterização de aço inoxidável). Neste nível de temperatura, somente com o emprego de materiais de alto desempenho, como ligas de Molibdênio (Mo), é possível realizar com sucesso a operação – tanto nos elementos do suporte de componentes, como naqueles com função de blindagem térmica e de aquecimento. Materiais com estas características apresentam, invariavelmente, custos de matéria-prima e de fabricação bastante elevados. Entre as opções comerciais disponíveis, ligas de Mo são a menos dispendiosa capaz de atender às necessidades.

Além de estabilidade em alta temperatura, os suportes de componentes devem possuir geometria favorável à exposição dos componentes em processamento aos efeitos proporcionados pelo plasma e à renovação local da mistura gasosa de modo continuado. O processamento para tratamento superficial, como na nitretação, requer o posicionamento de componentes no cátodo, onde há bombardeamento catiônico. No caso da extração de ligantes, é usado o posicionamento sobre o ânodo, onde a incidência é principalmente de elétrons.

3. CONTROLE DE TEMPERATURA NA CARGA POR ZONAS

Para o reator reportado anteriormente, um conjunto de resistências de Mo, posicionadas no perímetro interno do conjunto de blindagens (de geometria cilíndrica, orientado verticalmente) e radiando calor diretamente para a carga, foi a configuração adotada para definir três zonas independentes de controle de temperatura no suporte de componentes (Figura 1).

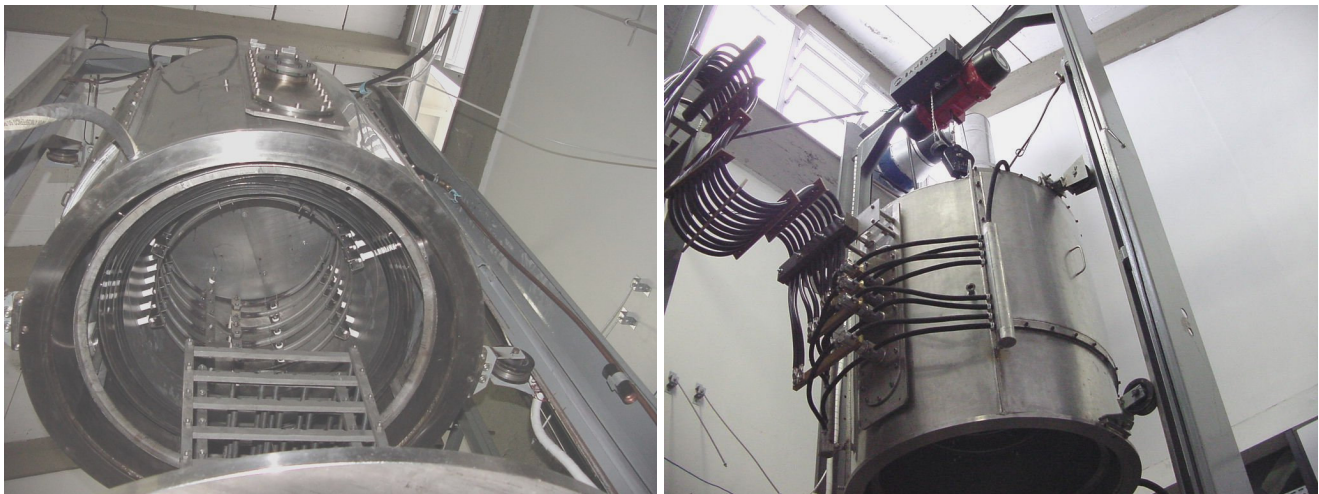


Figura 1: Instalações do reator de plasma.

Cada zona é aquecida por um par de resistências elétricas de Mo, alimentadas por transformadores rebaixadores de tensão e com potência regulada pelo ângulo de fase de condução de tiristores.

Para possibilitar a implementação de um controle PI (proporcional-integral) de temperatura, é necessário realizar-se primeiramente a linearização da potência elétrica em função do ângulo de fase. Esta função é dependente do valor da resistência elétrica, que por sua vez varia (aumenta) fortemente com a temperatura. Assim, um mesmo ângulo de fase determina potências bastante distintas em temperaturas diferentes. A não observância deste fato causaria, em temperaturas próximas da ambiente, uma demanda de corrente elétrica muito alta e o desarme de disjuntores de proteção.

Sistema de aquecimento auxiliar resistivo

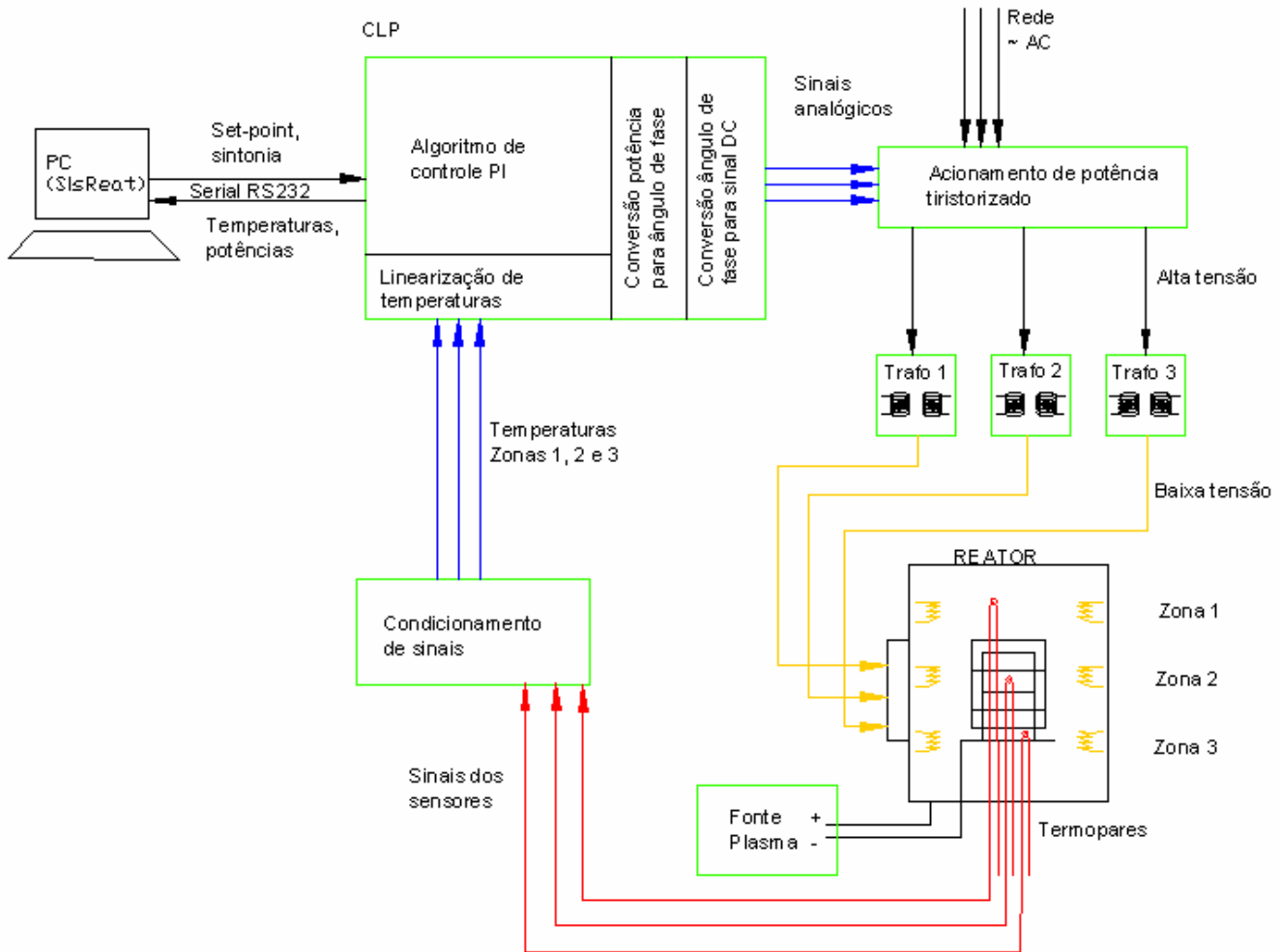


Figura 2: Esquema do sistema de aquecimento auxiliar.

As potências máximas admissíveis no sistema de aquecimento auxiliar são superiores às necessárias para sustentar as temperaturas de processamento (mesmo as mais altas) para que se possa elevar a temperatura da carga com velocidade quando desejado. Por segurança, além de sensores que determinam a interrupção da administração de potência em condições de perigo, é recomendável que o algoritmo de controle seja executado em uma plataforma de processamento confiável. Como é extremamente difícil obter essa confiabilidade em um PC (com sistema operacional Microsoft WindowsTM), ainda que neste a capacidade de processamento seja bastante superior, optou-se pela integração de um CLP com recursos de I/O analógicos e programável em linguagem descritiva, a cargo do qual fica a execução do algoritmo. Entretanto, com a opção por um CLP perde-se em qualidade de interface, memória e capacidade de realização de cálculos – o que neste caso seria desejável, haja vista as não-linearidades discutidas acima. A solução encontrada foi a criação de uma tabela de interpolação na memória do CLP, correspondendo os percentuais de potência aos ângulos de fase nos tiristores diretamente. Estes ângulos são então mapeados para as saídas analógicas, em conformidade com a faixa de entrada admitida pelos tiristores. Um ajuste de máximo para a potência é feito aplicando-se um redutor linear sobre o ângulo de fase. A sintonia e a programação de *set-point* (comum às três zonas) dos controladores PI pode ser feita a partir do SisReat, manualmente por um operador ou programaticamente, como quando da execução de um ciclo pré-definido.

3.1 Aquecimento em malha aberta

As curvas da Figura 3 foram obtidas em uma sessão de teste de aquecimento em malha aberta das três zonas de temperatura. A tendência das curvas evoluírem segundo exponenciais decrescentes a cada degrau reflete o comportamento típico de sistemas de primeira ordem.

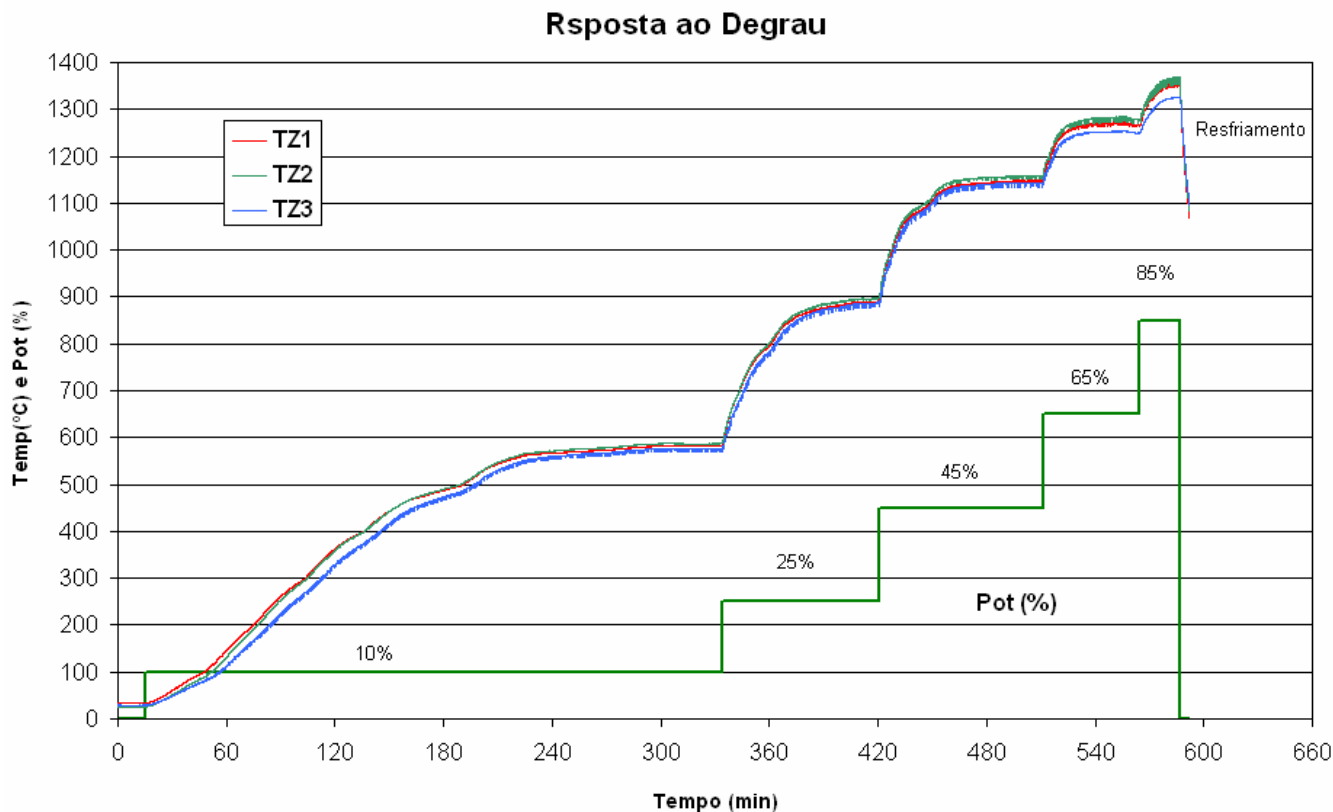


Figura 3: Reposta do sistema em malha aberta.

Como pode ser observado no gráfico de aquecimento em malha aberta, há uma tendência por parte do sistema de desenvolver um gradiente térmico entre as zonas. A Zona 3 situa-se no terço inferior do conjunto do suporte, em contato com a base de sustentação, apresentando, portanto, maior propensão para perder de calor por condução.

3.2 Controle de temperatura em malha fechada

Quando se faz o fechamento da malha de controle, o controle PI assegura um gradiente menor e dentro de uma tolerância satisfatória. O gráfico da Figura 4, construído com dados de um ciclo de processamento de moldados por injeção, apresenta o comportamento das temperaturas controladas. No trecho compreendido entre os tempos de 155' e 195' ocorre a sinterização. Em 180', com o valor de set-point em 1150°C, a temperatura na zona 2 (TZ2) marcava 1151°C, enquanto Z1 apresentava um gradiente de -6°C e Z3 de -17,5°C em relação a Z2. As temperaturas foram tomadas com termopares tipo K.

Temperaturas e Potências - Zonas 1, 2 e 3

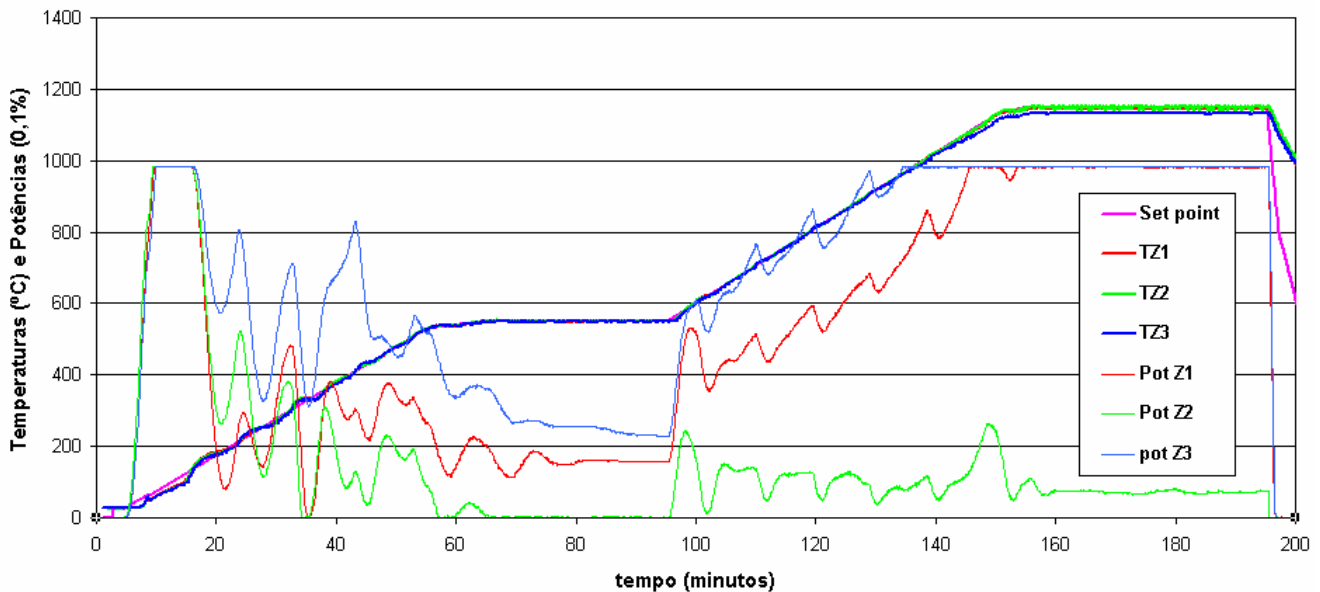


Figura 4: Gráfico ilustrando o desempenho do sistema com três zonas de controle de temperatura.

4. CONCLUSÕES

O sistema de aquecimento auxiliar por zonas independentes implementado confirmou a diminuição esperada dos gradientes de temperatura no suporte e da incidência de arcos. O melhor controle da temperatura dos lotes de peças no sistema torna possível a execução e reprodução com maior fidelidade dos ciclos, o que facilita o desenvolvimento de ‘receitas’ de processamento para diferentes tipos de materiais e aumenta as chances de sucesso de seu emprego em um sistema de produção.

Com os dados obtidos, pode-se notar que o desempenho do algoritmo de controle de temperatura não é o mesmo ao longo do processo. Eventualmente, uma sintonia variável do sistema de controle poderá ser adicionada (controle adaptativo), caso seja observado algum resultado insatisfatório nos materiais processados que possa ser atribuído a esse desempenho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHAPMAN, Bryan N., **Glow Discharge Processes**, New York, John Wiley and Sons, 1980.
2. KOVACS, W., RUSSEL, W., An Introduction to Ion Nitriding – What is it? Why is it used? Where is it used?. In: Proceedings of International Conference on Ion Nitriding, ASM International, 1986, p. 9-17.
3. REMBGES, W., OPPEL, W., Process Control of Plasma Nitriding and Plasma Nitrocarburizing in Industry. **Surface and Coatings Technology**, n. 59, p. 129-134, 1993.
4. MENDES, L. A. *et al*, The Application of Plasma Technology to Powder Metallurgy. In: 20th Heat Treating Society Conference, St. Louis, USA, 2000.
5. WENDHAUSEN, P. A. P. *et al*, A New Furnace Concept Based on Plasma Technology for Processing PIM Materials. In: Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, New York, USA, PMTECH 2000.
6. WENDHAUSEN, P. A. P. *et al*, Debinding of MIM Parts in a Plasma Reactor. In: 20th Heat Treating Society Conference, St. Louis, USA, 2000.

AUXILIARY RESISTIVE HEATING SYSTEM IN PLASMA REACTOR FOR MATERIALS PROCESSING

Luciano Antonio Mendes

Pontifical Catholic University of Paraná - Brazil

CCET – Engenharia de Controle e Automação

Rua Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho - Curitiba - PR - 80215-901 – Tel.: +55 (41) 271-1333

lmendes@rla01.pucpr.br

Davi Fusão

Aloísio Nelmo Klein

Jeol Louis René Muzart

Paulo Pereira Wendhausen

Federal University of Santa Catarina - Brazil

Campus Universitário, Trindade – Florianópolis – SC – 88040-900 – Tel.: +55 (48) 331-9268

CTC – Engenharia de Materiais - Campus Universitário, Trindade

davi@pg.materiais.ufsc.br; klein@materiais.ufsc.br; muzart@materiais.ufsc.br;

wendhausen@materiais.ufsc.br

Nilton Francisco de Oliveira da Silva

CEBRA/Engeplasma - Brazil

Rua Lauro Linhares, 589 – Trindade – Florianópolis – SC – CEP 88036-002 – Tel.: +55 (48) 333-1600

nilton@cebra.com.br

Abstract: *This article presents the design of an auxiliary resistive heating system and its implementation in a plasma reactor for materials processing, with three independent heating zones. The plasma reactor performs processes such as nitriding of mechanical parts, and debinding and sintering of powder injection moulding parts. In a plasma processes, gas mixture pressure, composition and flow in medium vacuum are controlled, as well as the energy transfer to plasma particles. The addition of the auxiliary heating has as objective a temperature field with minimum gradients along the load and the dissociation between plasma intensity and processing temperature. Due to the high temperatures reached in the vacuum chamber, as high as 1300°C in sintering stages, the reactor is internally equipped with a radiation shielding pack, made of molybdenum and stainless steel. The set of molybdenum resistors is mounted in the internal perimeter of the shielding. These resistors present a non-linear relation between resistance and temperature, so that a temperature control algorithm must take this fact into account to compute correctly the power at each moment. The algorithm was implemented in a PLC that uses a descriptive language. It controls the temperature in the set point sent by an external computational system that performs supervision, programming, logging and some other control functions, based on the LabVIEW® platform. Tests results are presented, and show a satisfactory performance of the system for its proposal..*

Keywords: *auxiliary resistive heating; temperature control; plasma reactor.*