

# PROJETO DE ROBÔ INDUSTRIAL PARA AUTOMAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO FERRO-GUSA EM ALTOS FORNOS\*

Rayanne Pimentel de Souza<sup>1</sup>  
Luis Felipe da Silva Sampaio<sup>2</sup>  
Ricardo Pires Mesquita<sup>3</sup>  
Amanda do Carmo Silva<sup>4</sup>  
Carlos Fernando Carlim Pinto<sup>5</sup>  
Fábio de Oliveira Braga<sup>6</sup>

## Resumo

Apesar dos avanços tecnológicos recentes em siderurgia, o processo de medição de temperatura do ferro-gusa na casa de corrida dos altos fornos ainda costuma ser realizado de forma manual. Esta operação é de alto risco para operador, que apesar de usar de equipamentos de proteção apropriados, não possui barreira física ou meio de proteção que torne a operação totalmente segura. Neste contexto, a utilização de robôs industriais pode eliminar o risco de acidentes, de modo que a medição de temperatura passe a ocorrer de forma mais precisa e produtiva. No presente trabalho foi idealizado um braço robótico para realização desta tarefa insalubre. Será mostrado o seu funcionamento geral, bem como o detalhamento dos circuitos elétricos e hidráulico.

**Palavras-chave:** Corrida de ferro-gusa; Alto-forno; Medição de temperatura; Robô industrial

## DESIGN OF AN INDUSTRIAL ROBOT FOR AUTOMATION IN MEASUREMENT OF THE PIG IRON TEMPERATURE IN BLAST FURNACES

### Abstract

Despite the recent technological advancements in the steel industry, the pig iron temperature measurement in the tapping area of blast furnaces is still performed by a human operator. This is a high-risk operation for personnel, and although they use proper protection equipment, there is no physical barrier or means of protection that make the operation totally safe. In this context, the use of industrial robots might avoid the risk of accidents so that the temperature measurement occurs more accurately and productively. In the present work, a robot arm has been idealized to perform this unhealthy task. It will be shown the general operation of the robot, as well as the electric and hydraulic circuit detailing.

**Keywords:** Pig iron tapping; Blast furnace; Temperature measurement; Industrial robot.

<sup>1</sup> *Graduação Tecnológica em Automação Industrial, Tecnólogo, Faculdade SENAI Rio, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Graduação Tecnológica em Automação Industrial, Tecnólogo, Faculdade SENAI Rio, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>3</sup> *Matemático, Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação, Docente, Faculdade SENAI Rio, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>4</sup> *Engenheira de Controle e Automação, Mestre em Engenharia Elétrica, Docente, Faculdade SENAI Rio, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Eletrônico e de Computação, Doutor em Engenharia Elétrica, Docente, Faculdade SENAI Rio, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>6</sup> *Engenheiro Metalurgista, Doutor em Ciência dos Materiais, Docente, Faculdade SENAI Rio, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais motivadores da criação de um robô é a utilização deste para realização de tarefas em que exista limitações ou riscos para o homem. Os robôs possuem natureza mais precisa e produtiva, e se adaptam melhor ao ambiente de processo produtivo [1]. Entre os riscos aos operadores humanos estão a exposição à radiação ou a elevadas temperaturas.

Na área da siderurgia, existem diversas atividades que podem representar risco para a saúde das pessoas que as executam. Um exemplo é a operação de drenagem do alto forno, que consiste em se perfurar a massa refratária no cadinho, de modo que o ferro-gusa e a escória, ambos em altas temperaturas, sejam escoados para os canais de corrida [2]. A drenagem do ferro-gusa envolve vários sub-processos, como a perfuração da parede do cadinho, a medição de temperatura do gusa e a obturação do furo com massa refratária [2].

O ambiente em que ocorre a operação de drenagem é denominado “casa de corrida”, localizado na parte inferior do alto forno, na altura do cadinho. Este ambiente é considerado insalubre para os operadores, especialmente aqueles responsáveis pela medição da temperatura do ferro-gusa, devido à sua exposição às altas temperaturas do metal líquido e da escória.

A medida da temperatura do gusa líquido nos canais de corrida é geralmente realizada por meio de um termopar descartável montado na extremidade de uma haste [3]. Medidas realizadas por sensores de infravermelho (sigla IR, do inglês *infrared*) também são utilizadas, mas podem apresentar imprecisão no caso de temperaturas demasiado altas e ambientes com alta quantidade de poeira [4]. Têm sido relatadas na literatura várias tentativas de se realizar a medição de temperatura do gusa de forma a diminuir a exposição do operador às altas temperaturas, além de se buscar melhorar a precisão dos instrumentos atuais. Usamentiaga *et al.* (2012) [5], desenvolveram um sistema de medição que utiliza a emissividade em IR do ferro-gusa. O desafio dos autores, neste caso, foi filtrar a emissão de IR proveniente da escória, de forma que a temperatura correta do gusa líquido fosse medida. Sigiura *et al.* (2014) [3] fez uma investigação similar, porém foi proposta uma medição contínua, utilizando câmeras CCD com obturador de alta velocidade. Jianget *et al.* (2016) [4] propuseram uma forma de se medir a temperatura no interior do furo de corrida pela medição de temperatura do canal de corrida, utilizando um modelo de transferência de calor. Neste caso, a medição de temperatura nos canais de corrida ocorreu pela introdução de termopares no interior dos tijolos e do concreto refratário dos canais de corrida. Naturalmente, estes termopares foram utilizados em um curto período de tempo.

Levando-se em conta o espaço físico da casa de corrida e a complexidade da atividade da medição de temperatura do ferro-gusa nos canais de corrida, foi desenvolvida a ideia de projetar um braço robótico móvel que seja capaz de realizar a medição com mais segurança, confiabilidade e menores custos. A automatização da medição de temperatura possibilita a maior precisão para a retirada do termopar do ferro-gusa após a operação, fazendo com que não haja uma queima desnecessária destes sensores. Uma lança adaptada sobre o braço mecânico tem o potencial de eliminar os impactos entre a bateria e o solo, causados pelo operador após realizar a medição, reduzindo assim os custos adicionais com os termopares e troca de bateria, e cooperando para uma melhor manutenção e durabilidade.

Deste modo, o objetivo do presente trabalho é projetar um braço robótico para auxiliar na operação de medição de temperatura do ferro-gusa líquido, de forma a reduzir o tempo de exposição do operador à área de risco e aumentar a confiabilidade da operação.

## 2 PROCESSO ATUAL DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Após a perfuração do furo de corrida, o ferro-gusa é direcionado para o chamado “pocinho”, onde é medida sua temperatura. Imagens explicativas da medição de temperatura podem ser vistas na Figura 1. O ferro-gusa, neste caso, é escoado em direção ao carro torpedo que fica posicionado um nível abaixo da casa de corrida. A medição de temperatura é fundamental na qualidade do produto final e para diagnosticar possíveis problemas nos altos fornos. A medição de temperatura deve ser realizada três vezes a cada corrida, e o resultado fica registrado no sistema supervisório do alto forno.



**Figura 1.** Etapas da medição de temperatura do ferro-gusa no pocinho pelo operador.

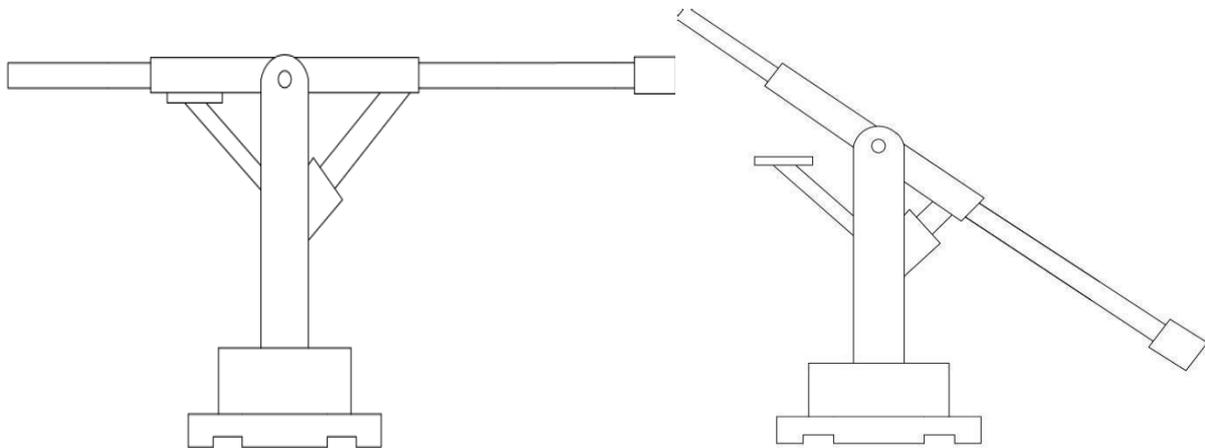
A medição de temperatura é feita pelo operador, que se posiciona próximo ao pocinho com o auxílio de uma lança com um termoparacoplado. Na extremidade da lança onde se encontra o termopar é inserido um sensor descartável. No painel de sinalizações visuais, é acesa uma luz, indicando que o circuito está fechado entre termopar e sensor, simulando a junta de ligação do termopar e habilitando a operação. O sensor então é submergido no material fundido, evitando o contato direto do termopar com o material em elevada temperatura. O operador projeta a ponta da lança com o sensor descartável no ferro-gusa e a mantém em contato com o material até que o alarme sonoro toque, sinalizando abertura do circuito entre termopar e sensor descartável, e o indicador visual aponta a temperatura marcada pelo instrumento. Após os alarmes acionados, o operador retira a lança do contato

com o material, realiza o descarte do sensor e retorna com a lança para o local adequado. Muitas vezes, ao posicionar a lança no local indicado pela operação da casa de corrida, os operadores acabam posicionando-a com força excessiva sobre o chão, causando impactos prejudiciais a vida útil da bateria responsável por emitir o sinal via wireless. Tais impactos não desejados interferem na durabilidade e conservação da manutenção do equipamento, sendo necessária a substituição da bateria.

## 2 PROJETO DO ROBÔ

### 2.1 Estrutura do robô

O modelo proposto é composto por uma estrutura móvel, contendo um braço mecânico, um motorreductor de velocidade, um atuador hidráulico e a lança de medição de temperatura. A visão geral da estrutura pode ser vista na Figura 2.



**Figura 2.** Esquema ilustrativo do robô: (a) em seu estado inicial; (b) em processo de medição.

O motorreductor é responsável por realizar o giro da base do braço mecânico, movimento necessário no momento de troca do sensor descartável. Este movimento permite que o operador mantenha-se longe da área de risco, e no momento da medição, garante que o braço mecânico estará na posição correta, com a lança apontada para o pocinho. O atuador hidráulico, por sua vez, é responsável pelo movimento de avanço e recuo da parte móvel do braço mecânico.

A lança de medição deve possuir cerca de 5 metros de comprimento e 3 kg de massa, e adaptada com bateria de comunicação wireless em uma de suas extremidades. Ela é posicionada e fixada na parte móvel do braço mecânico.

Um painel de comando deve ser instalado próximo à área de segurança do operador. Os comandos devem possuir interligação com a unidade hidráulica e, ao acionar a solenoide de avanço ou de recuo por uma botoeira, fazem com que o fluido na linha atue o cilindro hidráulico (permitindo a realização da medição de temperatura) ou retorne para o tanque (fazendo com que o cilindro retorne para sua posição inicial).

### 2.2 Funcionamento do robô

Para que seja realizada a medição de temperatura, o sensor indutivo (indicando o status de pronto na programação) deverá estar atuado e o circuito entre termopar e

sensor descartável também deverão estar acionados, sinalizados no display ao lado do painel de comando pela luz verde. Após sensor e sinalização atuados, será acionada a chave seletora no sentido avanço do braço no painel de comando, acionando assim uma solenoide. Esta é responsável por fazer com que o cilindro recue, movimentando a parte móvel do abraço mecânico em direção ao pocinho que se encontra com o material a ser medido, como mostra a Figura 2b.

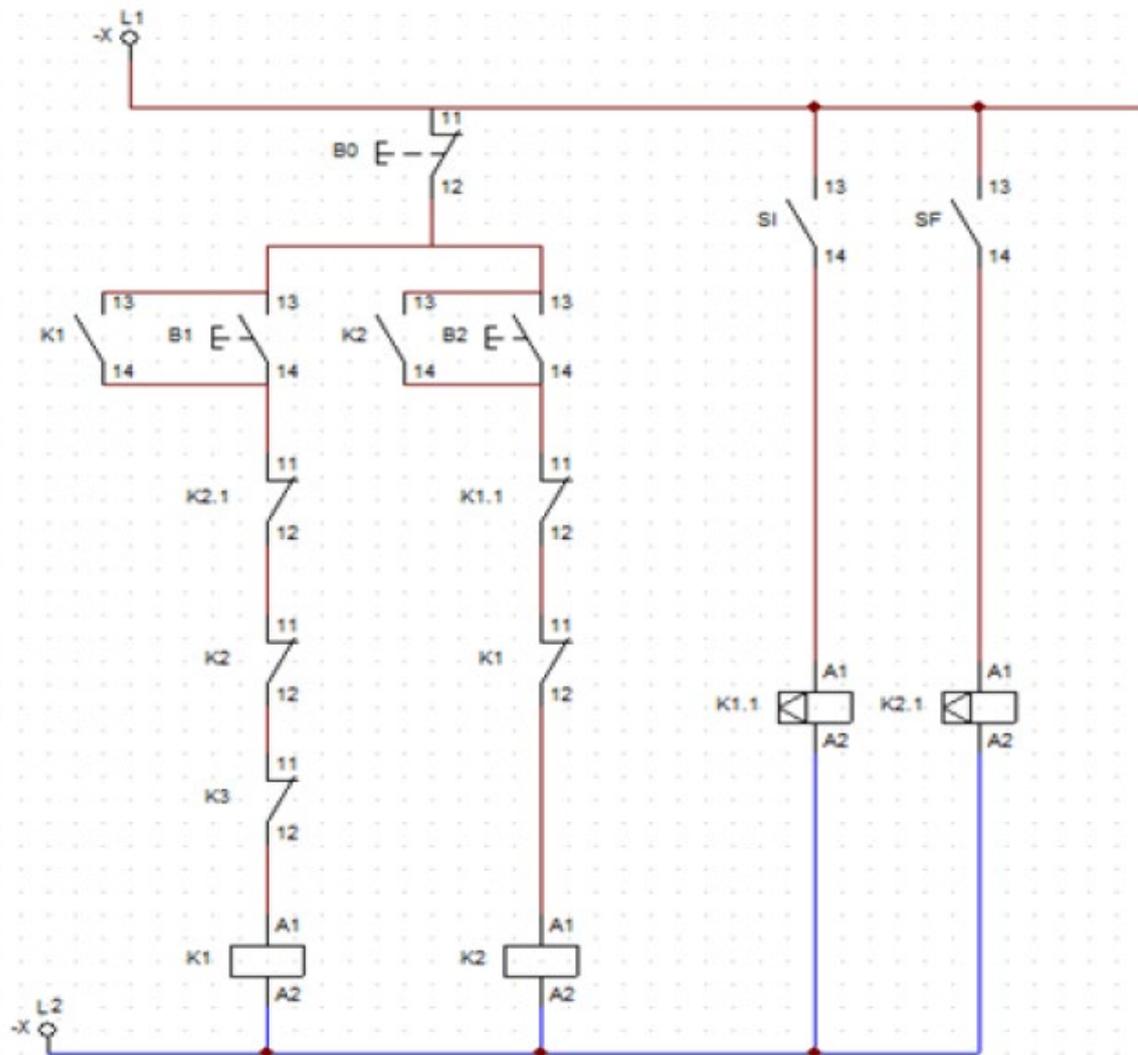
Ao variar a temperatura captada pelo sensor, acenderá uma luz amarela no display (juntamente com a luz verde). Ao atingir a temperatura máxima, o filamento no interior do sensor responsável por fechar o circuito (sensor/termopar) será rompido, fazendo com que o circuito abra, e gerando um sinal para a solenoide através do módulo wi-fi. Neste momento a solenoide de avanço do cilindro será acionada automaticamente, e fará com que o fluido circule pela linha e o cilindro retorne imediatamente a sua posição inicial (Figura 2a), retirando o sensor do contato direto com o material e evitando a queima do termopar. O alarme sonoro soará e uma luz vermelha acenderá no display ao lado do quadro de comando, indicando circuito aberto e temperatura máxima captada.

Para caso de emergência ou agarramento do braço mecânico, o operador poderá acionar a chave seletora no painel, na posição que indica recuo da lança, acionando assim a solenoide de avanço do cilindro, retirando imediatamente a lança e o sensor descartável do contato direto com o material. A unidade hidráulica também conta com o auxílio de uma válvula de emergência, para alívio da linha se necessário.

O valor medido é transmitido via wireless para um access point próximo aos painéis, afastado de interferências e ruídos, para uma precisão maior de coleta de dados. O valor é capturado e congelado no display de sinalização até que a próxima medição de temperatura seja realizada. Os valores são transmitidos para a sala de controle, onde ficam registradas as últimas medições (normalmente 3) na tela do supervisor. Antes de realizar a próxima medição, o operador deverá acionar o botão de giro da base do braço mecânico, onde o sensor de pronto será desacionado e atuará o sensor de giro automaticamente ao atingir 90°, o operador irá até o local de troca em segurança e realizará a troca do sensor descartável em segurança. Após a troca do sensor descartável, deverá ser acionado o botão de posição pronto no painel de comando, fazendo com que o braço mecânico se movimente no sentido contrário e retorne a posição de medição de temperatura. Neste momento o sensor de giro será desacionado e ao atingir 90°, será atuado o sensor de pronto, atendendo a uma das limitações para que a medição seja efetuada como desejado.

## 2.3 Diagramas elétricos

A Figura 3 mostra o diagrama de comando do giro do motor.



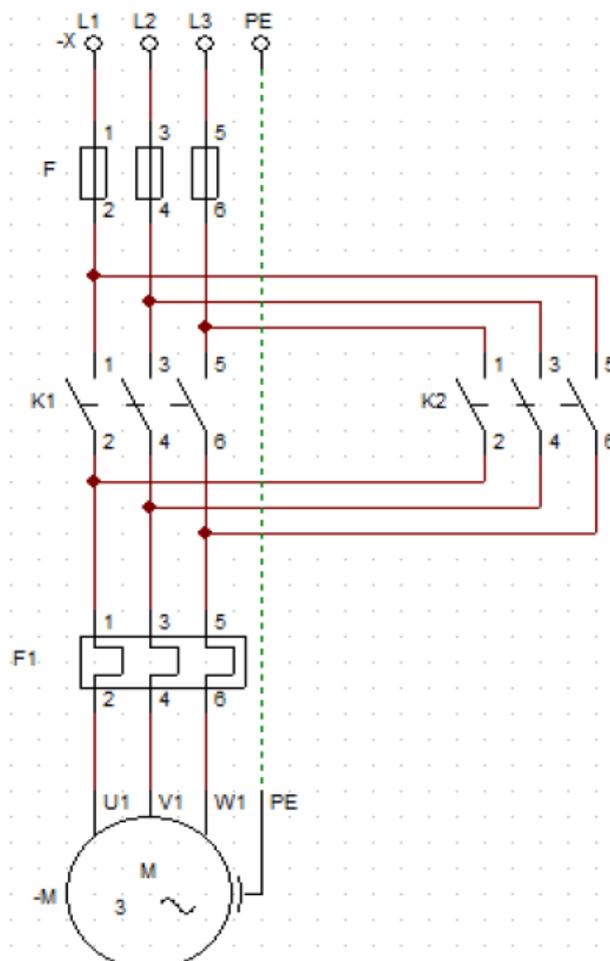
**Figura 3.**Diagrama de comando do giro do motor. B<sub>0</sub>= Botão de emergência; B<sub>1</sub>= Botão de pulso, motor liga em sentido horário; B<sub>2</sub>= Botão de pulso, motor liga em sentido anti-horário; K<sub>1</sub> e K<sub>2</sub>= Contactoras; SI= sensor indutivo, sensor de posição pronto; SF= Sensor indutivo, sensor de posição eixo deslocado.

O diagrama inicia-se com um contato normalmente fechado (NF) e B<sub>0</sub>, permitindo a passagem de tensão para o circuito em B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>. Ao acionar o botão B<sub>1</sub>, será alimentada a bobina da contactora K<sub>1</sub>, pois os contatos de intertravamentos na linha são de estado NF, enquanto K<sub>3</sub> simboliza um permissível do diagrama de avanço e recuo do braço robótico, como será visto posteriormente.

A bobina de K<sub>1</sub>, ao ser alimentada, abrirá o contato normalmente aberto (NA) na linha de B<sub>2</sub>, fazendo o intertravamento e fechará o contato NA em paralelo com o botão fazendo o selo do circuito e permitindo que a bobina de K<sub>1</sub> permaneça alimentada ao soltar o botão B<sub>1</sub>. K<sub>1</sub> energizado permite que o motor da base de giro atue, movimentando o eixo do braço robótico no sentido horário. Neste momento, o braço será projetado para fora do pocinho. O braço robótico se movimentará aproximadamente em um ângulo de 90°, ao atingir a angulação identificada pela presença de um sensor indutivo (SF), o relé com remanência K<sub>2.1</sub> será acionado, fazendo com que seus contatos NF passem para o estado NA. Deste modo, o contato de intertravamento na linha de B<sub>1</sub> da bobina K<sub>2.1</sub> se abrirá, e a bobina de K<sub>1</sub> será desenergizada, interrompendo o movimento do motor da base de giro.

Assim, o operador poderá realizar a troca do sensor descartável em segurança, distante da zona de perigo.

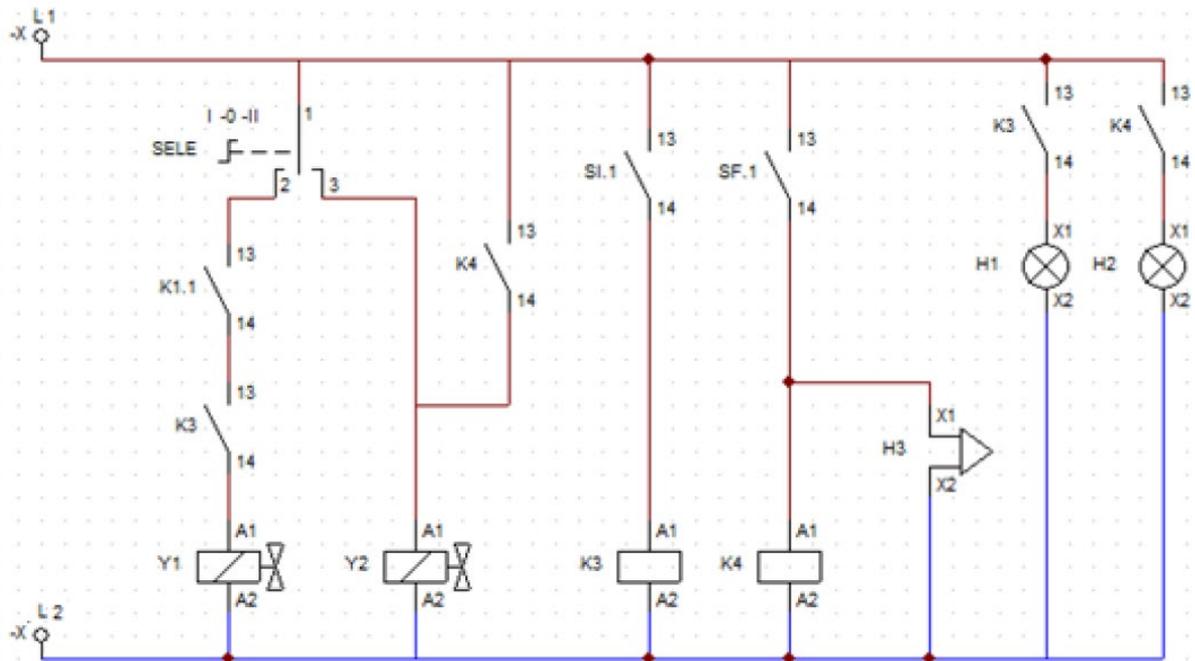
Após a troca do sensor descartável, o operador acionará no painel de comando o botão B2 (é auxiliado que o botão B2 seja acionado somente nas horas específicas de realizar as medições de temperatura, evitando exposição contínua da lança em temperaturas elevadas). Ao acionar o botão B2 (botão de reversão de sentido de giro do motor), será alimentada a bobina da contactora K2, pois os contatos de intertravamentos na linha são de estado NF. A bobina de K2, ao ser alimentada, abrirá o contato NA na linha de B1, fazendo o intertravamento, e fechará o contato NA em paralelo com o botão, fazendo o selo do circuito e com que a bobina de K2 permaneça alimentada ao soltar o botão B2. K2 energizado permite que o motor da base de giro atue, movimentando o eixo do braço robótico no sentido anti-horário. Neste momento, o braço será projetado para direção do pocinho. O braço robótico se movimentará aproximadamente em um ângulo de  $-90^\circ$ , ao atingir a angulação identificada pela presença de um sensor indutivo (SI), o relé com remanência K1.1 será acionado, fazendo com que seus contatos NF passem para o estado NA e seu contato NA no diagrama de elevação e recuo do braço passe para o estado NF. Deste modo, o contato de intertravamento na linha de B2 da bobina K1.1 se abrirá e a bobina de K2 será desenergizada interrompendo o movimento do motor da base de giro, ficando o braço robótico então na posição de pronto. A seguir será apresentado o diagrama de força do giro do motor (Figura 4).



**Figura 4.** Diagrama de força do giro do motor. L1, L2 e L3 = fases; PE = aterramento; K1 = Contactora para sentido horário; K2 = Contactora para reversão no sentido anti-horário; F1, F2 e F3 = Fusíveis; M = motor trifásico.

Pela Figura 4 observa-se que as três fases passam pelos fusíveis. Ao ser acionada por B1 no comando da base de giro, e as condições satisfeitas, a bobina de K1 é energizada, fechando seus contatos principais e fazendo com que o motor se movimente em sentido horário. B2 ao ser pressionado e condições satisfeitas, energiza-se a bobina de K2, devido a inversão das fases L1 e L3, o motor se movimenta em sentido anti-horário.

O comando de avanço e recuo do braço robótico é mostrado na Figura 5.



**Figura 5.** Comando de avanço e recuo do braço robótico. Chave seletora 3 posições (1, 2 e 3). Solenoide de avanço do braço; Solenoide de recuo do braço; K3 = Contactora, simbolizando circuito fechado entre lança/sensor descartável; K4 = Contactora, simbolizando circuito aberto entre lança/sensor descartável; H1 = Sinaleira, simbolizando circuito fechado entre lança/sensor descartável; H2 = Sinaleira, simbolizando circuito aberto entre lança/sensor descartável; H3 = Alarme sonoro, simbolizando circuito aberto entre lança/sensor descartável. Y1 = Solenoide de avanço. Y2 = Solenoide de recuo.

Pela Figura 5 observa-se que ao acionar a chave seletora para o lado 1 (avanço do braço), é necessário que as condições desta linha estejam satisfeitas, os contatos de intertravamento devem se encontrar em estado NF. Para tal condição, o sensor de posição pronto precisa estar atuado, significando assim que o braço robótico está com a lança em direção ao pocinho, acionando a bobina de K1.1. Para que o braço realize o movimento de avanço, ainda é necessário que a bobina de K3 esteja alimentada, para que o contato NA de K3 na linha de posição 1 da seletora passe para o estado NF. Para que K3 seja habilitado é necessário que o contato SI.1 (referente ao circuito fechado termopar/sensor descartável) esteja fechado. Tal condição é realizada ao inserir o sensor descartável na extremidade da lança que se encontra o termopar. Após circuito fechado, a bobina de K3 será alimentada, fazendo com que os contatos NF passem para o estado NA e os contatos NA passem para estado NF. Após as condições de K1.1 e K3 supridas, a solenoide responsável pelo avanço do braço Y1 é acionada fazendo com que o sensor descartável entre em contato com o ferro gusa e no mesmo instante, acenderá no painel de comando a sinalização H1, indicando a medição de temperatura. Ao atingir temperatura suficiente para romper filamento no interior do sensor descartável, o

circuito será aberto. Neste momento, o contato de SI.1 se abrirá, a contactora K3 perderá alimentação, seus contatos retornarão ao estado inicial, a sinalização H1 no painel se apagará e a solenoide de avanço será desenergizada. O contato SF (referente ao circuito aberto termopar/sensor descartável) será fechado, habilitando a contactora K4. Ao ser energizada a bobina de K4, o contato referente a K4 alterará seu estado de NA para NF, acenderá no painel a sinalização H2, indicando temperatura medida. A sirene H3 irá soar para que o operador se atente ao valor medido no display próximo ao painel de comando e imediatamente a solenoide responsável pelo recuo do braço robótico Y2 será acionada, permitindo seu retorno para posição inicial. Para casos de emergência em que o braço robótico não recuar automaticamente no momento em que a sirene soar e a sinalização indicar no painel temperatura medida, o operador poderá realizar o recuo do braço instantaneamente ao posicionar a chave seletora na posição 2, pois para tal posição não há intertravamentos. Após medição, operador deve retornar chave seletora para posição 0, garantindo uma maior segurança.

Há dois contatos NF da contactora K3 no diagrama de base de giro, os contatos NF possuem a finalidade de intertravar os dois circuitos (giro e avanço/recuo), garantindo que o motor não entrará em operação durante a medição de temperatura, vindo a danificar o equipamento e proporcionar condições inseguras.

### **2.3 Diagrama hidráulico**

O circuito hidráulico (Figura 6) é composto de um pistão hidráulico já avançado em sua posição inicial, que será atuado a partir do sinal recebido através da solenoide Y1 do sensor de pronto (SI) que irá trocar a posição da válvula direcional 4/2 vias, fazendo assim com que o cilindro seja recuado, guiando assim a lança de temperatura em direção ao ferro-gusa.

O recuo da lança será efetuado a partir do avanço do cilindro, realizado o momento em que o sensor recebe o sinal de que a temperatura máxima foi medida, e então a solenoide Y2 troca a posição a válvula direcional, trazendo o atuador para sua posição avançada inicial.

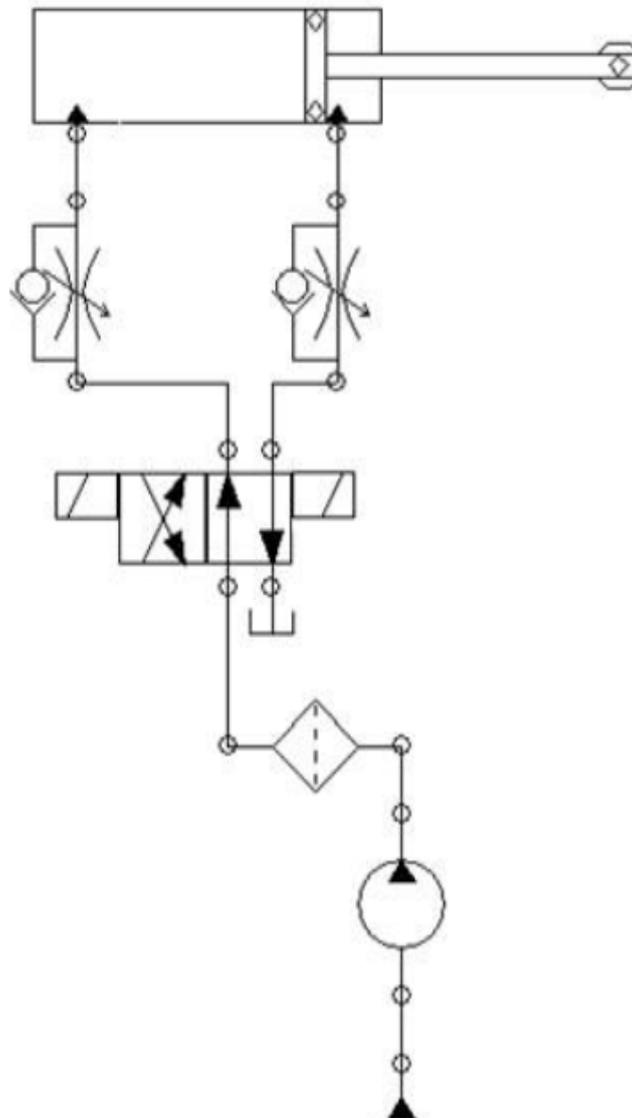


Figura 6. Circuito hidráulico.

### 3 CONCLUSÃO

Através do presente estudo, verificou-se que é viável a implantação de um braço mecânico para realizar medição de temperatura de ferro-gusa nos canais de corrida. Esta modificação busca proporcionar segurança e aumentar a qualidade de vida dos operadores da casa de corrida, reduzindo sua exposição à área de risco. O presente equipamento permite reduzir as manutenções corretivas em baterias de comunicação wireless e reduzir custos por aumentar a vida útil dos termopares tipo S e a troca de baterias. A manutenção no braço robótico pode ser realizada em outros locais, devido a sua base ser móvel, tornando tal atividade também segura. O projeto utilizando acionamentos hidráulicos visa aproveitar os pontos de hidráulica já instalados na planta dos altos fornos, próximos ao pocinho, minimizando gastos na implementação do projeto

### REFERÊNCIAS

- 1 Rosário JM. Robótica industrial – Modelagem, utilização e programação. São Paulo: Ed. Baraúna, 2009.

- 2 Mourão MB, Yokoji S, Malynowskyj A, Leandro CAS, Takano C, Quites EEC, Gentile EF, Silva GFBL, Bolota JR, Gonçalves M, Facó RJ. Introdução à siderurgia. São Paulo: Ed. ABM, 2011.
- 3 Sigiura M, Otani Y, Nakashima M, Omoto N. Continuous temperature measurement of liquid iron and slag tapped from a blast furnace. SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration. 2014;7(3):147-151.
- 4 Jiang ZH, Pan D, Gui WH, Xie YF, Yang CH. Temperature measurement of molten iron in taphole of blast furnace combined temperature drop model with heat transfer model. Iron & Steelmaking. 2016 [acesso em 12 Mai. 2018]. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/03019233.2016.1254423>.
- 5 Usamentiaga R, Molleda J, Garcia DF, Granda JC, Rendueles JL. Measurement of molten pig iron with slag characterization and detection using infrared computer. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012;61(5):1149-1159..